L'EQUIVALENTE MECCANICO DEL CALORE CON UN SAGGIO DI STORIA DELLA...

Guido Vimercati

L' EQUIVALENTE MECCANICO
DEL CALORE

CON UN SAGGIO

DI

STORIA DELLA TERMODINAMICA

DI

GUIDO VIMERCATI

Ingegnere Civile

FIRENZE
Tipografia dell'Associazione

1870.

L' EQUIVALENTE MECCANICO
DEL CALORE
CON UN SAGGIO
DI
STORIA DELLA TERMODINAMICA

INDICE

PARTE PRIMA

SAGGIO D'UNA STORIA DELLA TERMODINAMICA

PARTE SECONDA

Determinazione sperimentale dell'equivalente meccanico del calore.

PARTE TERZA

Determinazione analitica dell'equivalente meccanico del calore

INTRODUZIONE-GENERALITÀ

> « Omnium affectuum naturalium causas esse planius per rationes mechanicas vel illud nostrum spem abjicere aliquid in physica intelligendi »
>
> HUYGHENS
>
> *Tractatus de lumine* — Amstelodami 1727 pag. 2

Nel suo progredire lo spirito umano ha percorso il cammino apparente del sole; nata nell'estremo Oriente, la civiltà andò poco a poco avanzandosi e spandendosi in tutte le regioni d'Occidente.

Nella storia di questo progresso dell'umano intelletto, storia così bella e profonda per ammaestramenti, si riscontrano due epoche distinte, due strati, dirò così, per valermi d'un geologico termine, i quali segnano due diverse formazioni.

Al primo di questi strati appartengono quei rudimenti della scienza i quali, avuto origine sulle sponde del Gange, si estesero di poi in Caldea o nell'Egitto, in Grecia e nel Romano impero, ampliandosi soltanto mercè una scienza ideale, mercè astratte cognizioni che formarono il fondamento alle speculazioni della metafisica fino al XVI secolo.

La vera filosofia naturale che partendo dall'osservazione del noto, esamina e coordina i fatti per risalirne alle ignote cause, non data che dalla metà del XVI secolo, che dal comparire cioè del secondo strato, quando il metodo sperimentale insegnato da LEONARDO DA VINCI venne a riportare, nelle mani di GALILEO, di BACONE e di NEWTON, sì belle e numerose vittorie sul metodo speculativo, vero freno al progresso.

Egli è a questo metodo sperimentale che noi dobbiamo il rapido svolgersi delle umane scoperte, il rapido progredire di questo flusso dell'umano sapere irresistibile ed incessante come quello del Gulf-Stream.

La luce, il calore, l'elettricità divennero istrumenti nelle mani dell'uomo, e la fotografia, la macchina a vapore, la pila voltaica sorsero a conferma dei miracoli che può fare la scienza sperimentale.

Un secolo prima dell'Era volgare, ERONE di Alessandria dava il primo esempio di moto ottenuto col vapore, e non fu che nel XVII secolo che BRANCA e SALOMONE DE CAUS lo impiegarono come motore, divenuto poi universale, per opera di WATT, nel secolo passato.

Seicento anni avanti l'Era cristiana TALETE di Mileto scopriva che l'ambra gialla soffregata attira pagliuzze, e questa proprietà, che il filosofo ionico chiamava *l'anima* dell'ambra, rimase l'unico fatto cono-

sciuto della elettricità, ed in soli trent'anni noi abbiamo assistito a qual rapido progresso che immortalò GALVANI e VOLTA, FARADAY ed ARAGO, OERSTED ed AMPÈRE!

E quando alla filosofia non venne lasciato che quanto v'è di ordine puramente morale, e gli studi naturali entrarono nel dominio delle scienze fisiche e matematiche, le leggi del mondo materiale si svilupparono prontamente e con una sintesi comparativa, sì splendidamente presentata nelle opere di GROVE e di SECCHI, si intravidero due grandi fatti che si possono chiamare le due leggi fondamentali della natura, la trasformabilità cioè di tutte le forze le une nelle altre, e l'equivalenza che sempre si mantiene in siffatte trasformazioni. I fenomeni del calore divennero semplice dinamismo della materia ponderabile, l'elettricità, il magnetismo, la luce, si avvicinarono alle meccaniche discipline e la legge della conservazione delle forze vive trionfando, chiuse l'epoca dei fluidi imponderabili.

Gli è a siffatto profondo e meraviglioso rinnovamento che noi assistiamo da circa un mezzo secolo, profondo e meraviglioso lavoro, giacchè con esso, per servirmi d'una bella espressione d'un nostro fisico, tutti i fenomeni che noi osserviamo, tutte le manifestazioni che ci presenta la materia, altro non sono che note d'un armonia celeste che canta il gran poema della trasformazione del moto (1), poema, possiamo dire, che con un meraviglioso reale, supera di gran lunga il meraviglioso fantastico di ARIOSTO e di MILTON.

Come, pel legame che AMPÈRE scopriva fra il magnetismo e l'elettricità, sorgeva l'elettro-dinamica, così per il legame fra il calore ed il moto, sorse una scienza d'alta portata filosofica e pratica, la *termodinamica* o *meccanica del calore*, già bella pel suo passato, più brillante ancora pel suo avvenire, giacchè, nata appena, essa gettava un ponte fra la meccanica e la fisico-chimica, atterrava la barriera che ostava il progresso all'intelligenza della meccanica molecolare e schierava sotto leggi meccaniche tutti i fenomeni fisici, chimici e fisiologici aprendo un nuovo e vastissimo orizzonte allo studio delle scienze naturali e formando la più grande scoperta che dopo NEWTON abbia fatto la filosofia naturale, secondo ben disse TYNDALL (2) che se è vero che ogni grande progresso compiuto nel dominio dell'intelligenza fu preceduto da una grande scoperta, si può affermare senza tema d'errore, che la mutua conversione delle forze naturali, sòrta dalla termodinamica, eserciterà un immensa influenza sull'educazione intellettuale delle età venture.

Che tra il moto ed il calore esistesse uno stretto vincolo, che allo spegnersi della forza viva si producesse calore, era cosa nota da lungo tempo. Quando ci moviamo, corriamo o facciamo ginnastica, la respirazione si attiva ed il nostro corpo suda; nei rigori dell'inverno freghiamo l'una sull'altra le mani e le mani si riscaldano, la pietra focaia percossa dall'acciarino manda scintille di fuoco, gli stivali ferrati dei montanari dell'Alpi producon faville urtando contro le roccie, collo sfregare due pezzi di legno i selvaggi producono il fuoco, dopo la tempesta è caldo il mare, un treno che corre colla velocità di 50 chilometri all'ora arriva alla stazione, i freni abbracciano le ruote, un po' di fumo ne sorte, la forza motrice è convertita in calore ed il treno si ferma; una palla di piombo urta contro una piacca fissa di ferro e si schiaccia diventando calda, l'acqua fredda d'un serbatoio sorte debol-

---

(1) MARCO FALICE — *Principi della teoria meccanica dell'elettricità e del magnetismo* — Torino — Paravia 1867.

(2) TYNDALL — *La chaleur considérée comme un mode de mouvement*, trad. dell'abate MOIGNO — Paris — Giraud 1864 pag. VII.

Digitized by Google

meate riscaldata se offuisce, sotto una pressione, da una luce ristretta. Gli è ancora all'azione meccanica dell'attrito che si deve attribuire il riscaldarsi che fa una palla tanto più quanto maggiormente si allontana dal cannone che l'ha lanciata; gli è ancora all'attrito contro le particelle dell'atmosfera che si attribuisce il brillante fenomeno delle stelle cadenti.

Anche in questi ultimi tempi si fecero esperienze degne d'esser notate sulle sorgenti del calore. Viard (1) con una verga elastica modulata sopra un tornio produce calore incurvandola; Leroux (2) fa diventare ardente nella estremità fissa una lamina vibrante; Becquerel (3) riconosce che due corpi d'eguale sostanza e d'indica superficie, fregati l'un sull'altro, si riscaldano egualmente, se una delle due faccie è meno levigata dell'altra, quella più pulita si riscalda di meno.

Troppo ci sarebbe a dilungarsi per citare esempi di azioni meccaniche che producon calore, ma che cos'è questo calore? È desso quel fluido materiale, imponderabile che può passare da un corpo ad un altro, e le cui molecole sono continuamente in uno stato repulsivo, come vuole l'ipotesi dell'emissione? — un fluido il quale, come credeva ancora Gmelin (4) può combinarsi coi corpi come due sostanze ponderabili si combinan fra loro?

Questa ipotesi della materialità del calore assurda, inammissibile e che tuttavia non è ancor bandita da tutte le scuole, veniva già messa in dubbio anzi negata, ai tempi di Bacone e di Galileo, e furono le successive osservazioni ed esperienze di Locke, di Bernouilli, di Rumford, di Davy, di Montgolfier, di Carnot che accumulatesi, giunsero a portare il loro frutto nel 1842 quando l'idea nuova si rivelò chiara e precisa alla mente dei fisici. Dal 1842 in poi per opera dei molti illustri che alacremente vi si adoperarono, la materialità del calorico venne distrutta e dalla sua rovina sorse maestosa la termodinamica che spiega i fenomeni del calore come moto trasformato e ne assoggetta le manifestazioni alle leggi della meccanica, al principio di Leibnitz, la conservazione delle forze vive.

Il movimento etereo solare che giunge alle foglie delle nostre piante, non sparisce, ma vi rimane permanente moto molecolare, onde ben diceva l'altissimo poeta:

> « E perchè meno ammiri la parola
> Guarda il calor del Sol che si fa vino,
> Giunto all'umor che dalla vite cola. » (5)

Il raggio solare, che separando i componenti dell'acido carbonico dell'aria, libera l'ossigeno ed affida alla pianta il carbonio, si ritrova in tutto il suo effetto di luce e di calore nel ceppo che arde nei nostri focolari, i grandi depositi di carbon fossile che troviamo nei terreni carboniferi altro non sono che enormi magazzini in cui stanno nascosti la luce ed il calore solare che giunsero sulla superficie del globo nei secoli trascorsi. E fu col lampo d'un uomo di genio che Stephenson, l'inventore delle strade ferrate, diceva a Buckland, vedendo passare un convoglio: Che cos'è che trascina sì rapidamente quell'enorme massa?

(1) *Comptes Rendus des Séances de l'Ac. des Sciences de Paris* t. XLI 1855 pag. 1171.
(2) *Comptes Rendus* ecc. t. L 1861 pag. 605.
(3) *Annales de chimie et de physique* — terza Serie t. XLVI pag. 293.
(4) Leopoldo Gmelin (nato nel 1788, morto nel 1853) — *Handbuch der theoretischen Chemie* — Heidelberg 1841 — t. I p. 22 della trad. inglese.
(5) Dante — *Purgatorio* — Canto XXV verso 76.

— La vostra locomotiva, rispondeva sorridendo il vecchio geologo. — Ma d'onde trae quella locomotiva la sua potenza trascinatrice? — Dal carbone che le arde nei fianchi, replicava BUCKLAND. — Sta bene ma, domandava ancora non pago STEPHENSON, bisogna trovare da che cosa il carbone trae la proprietà di bruciare, ed io penso che esso la prenda dal sole i cui raggi si fissano nel carbonio prodotto dalla respirazione delle piante sotto l'azione solare, e che vengono restituiti nel bruciare del carbone. È dunque il sole, BUCKLAND, quello che fa andare la mia locomotiva!

Questa proposizione, enunciata da STEPHENSON quarant'anni fa, allora incompresibile, è oggi una verità meccanica.

La termodinamica, gettando la sicura luce dell'esperienza sui fenomeni che legano le reciproche trasformazioni del lavoro e del calore, manifesta meravigliosamente la gran legge che nulla si distrugge, nulla si perde nelle opere della natura, e rende conto di tutti quei procedimenti che trasformano le une nelle altre tutte le forze naturali.

La termodinamica, teoria fisica nel rigoroso significato della parola, o che può definirsi *la scienza che tratta degli effetti meccanici dovuti al calore e del calore prodotto dagli agenti meccanici*, si basa sopra un ristrettissimo numero di principî, specie di postulati, suggeriti dall'esperienza, e coll'aiuto delle relazioni generali che si deducono per via matematica, coordina ed incatena tutti i fatti conosciuti.

Prendiamo una massa di ghiaccio in fusione, aggiungiamole continuamente del calore, il termometro non s'alza. — Cosa avviene del calore aggiunto?

Prendiamo dell'acqua a 100°, poniamola in contatto d'un focolare che le comunichi continuamente del calore. — Perchè il termometro non sale oltre i 100°?

Questi fenomeni furon quelli che fecero immaginare l'ipotesi del *calorico latente*, espressione non mai ben compresa.

La termodinamica spiega i due fenomeni. Il calore aggiunto al ghiaccio in fusione si trasforma in lavoro e vince le resistenze delle azioni molecolari. Il calore aggiunto all'acqua a 100° si trasforma in lavoro, e l'acqua si evapora.

Quando il moto calorifico viene comunicato ad un corpo, ne risultano in generale tre effetti.

1. Il moto vibratorio, già esistente nel corpo, si modifica, l'ampiezza e la velocità di vibrazione aumentano e si ha il riscaldamento del corpo, cioè l'elevazione di temperatura. Il moto è continuato, non trasformato.

2. Il corpo si dilata, cangia di volume, sono vinte le pressioni esercitate sulla sua superficie e si ha un *lavoro meccanico esterno*.

3. Nell'interno del corpo le molecole, vincendo la resistenza delle azioni molecolari, si allontanano, avviene un cambiamento nello stato di aggregazione e si ha un *lavoro meccanico interno*.

Fra questi lavori effettuati e la quantità di calore perduta, esistono determinati rapporti e la scoperta di questi rapporti è quella che costituisce il progresso più rimarchevole che la termodinamica ha fatto fare alla fisica moderna.

Si vede chiaramente come sia possibile, mediante l'esperienza, misurare il calore speso o guadagnato ed il lavoro esterno guadagnato o speso in queste trasformazioni, ma gli è il lavoro interno che nello stato attuale della scienza non può valutarsi (1), tuttavia v'è un mez-

(1) I lavori di Joule e di Thomson nel 1854 dimostrarono che nei gas il lavoro interno benchè piccolo non è nullo, ma che vale $\frac{1}{300}$ del lavoro esterno nell'aria ed $\frac{1}{77}$ nell'acido carbonico.

Digitized by Google

zo di togliere questa difficoltà, e questo consiste nel servirci di quei *cicli* la cui idea dobbiamo a CARNOT, i quali fatto passare un corpo per una serie di cambiamenti, lo riconducono allo stato iniziale, compensandosi così i lavori interni prodotti o spesi, come le corrispondenti quantità di calore.

Gli è facendo percorrere in due diversi sensi tali cicli a qualsiasi corpo della natura, in modo che il suo volume e la sua pressione, dopo tutte le subìte variazioni, ritornino allo stato iniziale che viene dalla termodinamica dimostrato che il rapporto fra il lavoro meccanico ottenuto e la quantità di calore spesa è un numero assoluto ed invariabile, onde vien così formulato il

Primo teorema di termodinamica: *Ogniqualvolta l'azione del calore sopra un corpo produce un lavoro meccanico, sparisce una quantità di calore rigorosamente proporzionale al lavoro prodotto, reciprocamente, tutte le volte che un lavoro meccanico è consumato a modificare lo stato di equilibrio interno d'un corpo, si sviluppa una quantità di calore rigorosamente proporzionale al lavoro speso. — Fra il lavoro così prodotto o speso ed il calore così speso o prodotto esiste un rapporto invariabile.*

Questa convertibilità vicendevole del calore e del lavoro, può derivarsi dal principio di permanenza ed indistruttibilità delle forze naturali, principio assiomatico, concisamente espresso dal latino *nihil ex nihilo, nihil in nihilum*, invocato da MAYER.

Ora, se per unità di calore adottiamo la *caloria*, cioè la quantità di calore capace di riscaldare d'un grado centigrado un chilogrammo di acqua, e per unità di lavoro il *chilogrammetro*, cioè il lavoro necessario a sollevare in un secondo un chilogrammo all'altezza di un metro, il principio fondamentale di termodinamica sopra esposto, chiamando Q la quantità di calore data ad un corpo, ed L il lavoro meccanico prodotto, si potrà brevemente scrivere così:

$$L = EQ$$

in cui **E** rappresenterà in chilogrammetri la quantità di lavoro dovuta alla distruzione di una caloria, ed è perciò che quell'**E** si chiama *Equivalente meccanico del calore*.

Reciprocamente

$$\frac{Q}{L} = \frac{1}{E}$$

rappresenta l'*Equivalente termico del lavoro* (1).

Gli è alla ricerca del valore numerico di **E** che si dedicarono JOULE, HIRN, FAVRE, MATTEUCCI, ecc., in molteplici modi la cui descrizione formerà la *Seconda parte* di questo lavoro e il cui valor medio più esatto e generalmente adottato è 425, laonde

$$E = 425 \text{ Chilogrammetri}$$

---

(1) Molti autori designano con E l'equivalente meccanico del calore e perciò con $\frac{1}{E}$ l'equivalente termico del lavoro; altri invece designano con $\frac{1}{A}$ il primo e con A il secondo. [illegible] designa l'equivalente meccanico del calore con J in onore di JOULE.

è l'equivalente meccanico del calore, cioè quando sparisce una caloria si producono 425 chilogrammetri di lavoro, perciò quando si consuma un chilogrammetro di lavoro si produce $\frac{1}{425}$ di caloria

Il principio dell'equivalenza ora annunciato non è il solo su cui si fonda la termodinamica. Nel 1824, benchè partisse da erronee idee, CARNOT fu il primo a dimostrare che qualunque sia il corpo che ci dà lavoro meccanico, quando lo si mette alternativamente in contatto d'un corpo caldo (sorgente di calore) e di un corpo freddo (refrigerante), la quantità di lavoro ottenuta non dipende che dalle temperature estreme fra le quali si opera.

Questa proposizione rimasa nella termodinamica, e benchè enunciata vent'anni prima del principio dell'equivalenza, essa gli deve susseguire costituendo il principio detto da taluni *della eguaglianza di rendita* o

Secondo teorema di termodinamica: *In una evoluzione chiusa (2) d'un corpo fra due determinati sorgenti di calore, il rapporto fra il calore preso dalla sorgente superiore (in temperatura) e quello versato nella inferiore è una quantità costante.*

Gli è sopra i due suddetti principii che si fonda tutta la teoria meccanica del calore nella cui storia sono celebri i nomi di RUMFORD, DAVY, JOULE, HIRN, FAVRE, MATTEUCCI, ecc. per la parte sperimentale, e di HELMHOLTZ, MAYER, CLAUSIUS, RANKINE, THOMSON, CODAZZA, ZEUNER, TURAZZA, SAINT-ROBERT, ecc. per la parte teorica.

La scoperta d'un principio fondamentale nelle scienze fisiche conduce di necessità a rischiarare di nuova e più potente luce le parti delle altre scienze, e ne risultano in breve numerose e meravigliose applicazioni. Questa verità non ebbe mai una conferma più luminosa quanto colla termodinamica.

Con essa non solo numerosi fenomeni che sembravano nulla aver di comune fra loro, venner ridotti a semplici questioni meccaniche risolte coll'analisi matematica, ma la teoria delle macchine termiche ne ritrasse un immenso e prezioso sviluppo, l'astronomia vi trovò, per opera di WATERSTON e di THOMSON la spiegazione della conservazione dell'energia solare, SAINT-ROBERT l'applicò alle armi da fuoco, MARTIN DE BRETTES all'artiglieria, HIRN, MATTEUCCI e BÉCLARD alla fisiologia, ecc. Infine, sia dal lato di grande scoperta teorica, sia da quello di feconda sorgente di pratica utilità, la termodinamica forma la più gran gloria scientifica che vanti il secolo nostro.

(2) Dicesi *evoluzione* la serie degli stati successivi che si possono far prendere ad un corpo; è *diretta* quando si spende calore e si raccoglie lavoro, è *inversa* quando spendendo lavoro si ottiene calore. Quando le evoluzioni diretta e inversa si combinano insieme (come ideò CARNOT) si ha l'*evoluzione chiusa* cui CLAUSIUS diede il nome di *ciclo chiuso* (*Kreisprocess*).

Digitized by Google

PARTE PRIMA

CENNI STORICI DI TERMODINAMICA

Capitolo I

Precursori della teoria meccanica del calore

GALILEO — BACONE — LOCKE — NEWTON — HUYGHENS — BERNOULLI

1623-1782

Moltissimi e, direi quasi, innumerevoli sono gli argomenti o le ipotesi che i metafisici dell'antica e della media età hanno formato sulla natura del calore.

Ligi alla massima delle scuole filosofiche di indovinare l'ignoto per spiegare di poi il noto, di formare ipotesi per poi verificare se esse soddisfacessero alla spiegazione dei fenomeni, invece di procedere dal noto all'ignoto, studiando i fatti e risalendo, gradino per gradino, alla spiegazione della lor causa, fisici e metafisici in varie età crearono molteplici ipotesi sulla natura del calore.

Siccome nessun ragionamento fatto *a priori* ci può condurre alla dimostrazione d'una verità naturale, siccome la fisica è scienza d'esperimento, di osservazione e non d'intuizione, noi dovremmo tenere in nessun conto, come fu detto da taluno, alcune supposizioni, alcune idee emesse dagli antichi fisici, per quanto, forse per mero caso, esse idee, esse ipotesi, divinate coll'intelletto anzichè dedotte dalla osservazione, possano oggidì trovarsi confermate nel modo il più brillante, il più luminoso dalla luce della scienza positiva.

Ma quando fra i nomi di quelli i quali, supponiamo pur sempre per avventura, colla scintilla del genio travidero sulla natura del calore, senza esperienze di sorta, ciò che oggi i fatti hanno dimostrato, noi troviamo i nomi di GALILEO e di NEWTON, ci sembra non esser fuor di luogo annoverarli fra gli uomini i quali precedettero la moderna teoria del calore.

A nessuno, di certo, verrà mai nel pensiero che la vasta mente di colui che primo

> vide
> Sotto l'etereo padiglion rotarsi
> Più mondi e il sole irradiarli immoto,

abbia detto: *il calore è moto*, senza che nessun fatto osservato, senza che nessun argomento avesse in lui provocato una tale supposizione, e come, primo, disse: *Eppur si muove*, così, primo, nel 1623, scriveva: *

* Avendo già veduto come molte affezioni che sono riputate qualità risedenti ne' soggetti esterni non hanno veramente altra esistenza che in noi, e fuor di noi non sono altro che nomi, dico che inclino assai a credere, che il calore sia di

questo genere, e che quelle materie che in noi producono e fanno sentire il caldo le quali noi chiamiamo col nome generale Fuoco, siano una moltitudine di corpicelli minimi in tal e tal modo figurati, mossi con tanta e tanta velocità, li quali incontrando il nostro corpo lo penetrino colla lor somma sottilità e che il lor toccamento fatto nel lor passaggio per la nostra sostanza e sentito da noi sia l'affezione che noi chiamiamo caldo.... Ma che oltre alla figura, moltitudine, moto, penetrazione e toccamento sia nel fuoco altra qualità e che questa sia caldo, io non lo credo altrimenti..... Ed essendo che questa affezione si pendano in noi nel passaggio e toccamento dei minimi ignei per la nostra sostanza, è manifesto che quando quelli stessero fermi la loro operazione resterebbe nulla .... Perchè adunque ad eccitare il caldo non basta la presenza degli ignicoli ma ci vuol il loro movimento ancora, quindi pare a me, che non fosse se non con gran ragione detto il moto esser causa di calore. » (1)

Non è senza dubbio a caso che Galileo negava in questo passaggio la materialità del calorico, ipotesi che duecent'anni circa dopo lui, nell'Università di Edimburg, il conte di Rumford, pubblicamente distruggeva.

Sembra però che anche il filosofo Bacone (2) contemporaneo di Galileo, avesse riconosciuto esser il calore una condizione della materia, un moto cioè delle sue intime particelle. Una tesi di questo genere si trova infatti sostenuta nel secondo aforismo al capitolo *Vendemmiatio prima de forma calidi* nel secondo libro del *Novum organum sive Judicia vera de interpretatione naturae* che è l'opera più importante lasciatoci dal barone di Verulamio (3).

Anche John Locke (4), solo sei anni dopo la morte di Bacone, espresso la stessa opinione con queste parole:

« Il calore è una vivissima agitazione delle parti insensibili dell'oggetto che produce in noi la sensazione che ci fa dire questo oggetto è caldo; di modo che ciò che nella nostra sensazione è calore nell'oggetto è moto. »

Nel 1687, l'ardito creatore della teoria dell'attrazione universale, teoria che gli diede la chiave di tanti misteri prima di lui impenetrabili come la marcia delle comete, la precessione degli equinozi, i moti e le perturbazioni dei pianeti, etc. Newton, concordando con Descartes, concepiva il principio che nella natura creata vi ha una certa quantità di moto che non cresce nè scema giammai, e considerava il calore come un moto molecolare suscettibile di mettere in movimento l'etere.

Fra i precursori della teoria meccanica del calore possiamo anche annoverare Huyghens il quale, tre anni dopo Newton, vale a dire nel 1690, scriveva le parole che prendemmo ad epigrafe della nostra *Introduzione*, che cioè:

« Se v'è speranza d'intendere qualche cosa nei fenomeni fisici è questa riposta nel concepire che tutte le lor cause consistano in azioni meccaniche. » (5)

e che, pel primo, emettendo l'ipotesi che la luce non è una sostanza, ma che consiste nella propagazione del moto oscillatorio delle ultime particelle d'un agente intermediario, creava la teoria delle ondulazioni,

---

(1) Galileo Galilei *Il Saggiatore* — Roma 1623 in 4° A questo proposito possiamo citare l'autorità dell'egregio P. A. Secchi il quale nel suo bel libro *La forza considerata nelle sue proprietà trasformazioni* cita questo passaggio di Galileo ch'egli annovera giustamente fra i precursori della termodinamica.

(2) Bacone Francesco, barone di Verulamio, nato il 22 Gennaio 1561, morto il 9 aprile 1626.

(3) Vedi le lezioni stampate a Leyda nel 1650 vedi anche un estratto di questo aforismo nel Tyndall — *La chaleur considérée comme un mode de mouvement*. Trad. dell'Ab. Moigno — Paris — 1874 pag. 11.

(4) Locke John — nato il 29 agosto 1632 morto il 28 Ottobre 1704.

(5) Huyghens — *Tractatus de lumine* Amsterdam 1727 p. 2

Digitized by Google

teoria la quale svolta in poi in sorprendente modo dall'inglese Young (1) e da Fresnel, illustrata dal nostro Melloni, avvalorata dalle ricerche matematiche di Cauchy e di Green, spiegava la diffrazione e la interferenze, la polarizzazione e la doppia rifrazione della luce. Così, accanto alla dinamica del calorico sorgeva e delineavasi, per mano di Huyghens la dinamica della luce, bandendo dal dominio della fisica la sostanze imponderabili, per cui, sulla fine del XVIII° secolo, già si considerava il calore e la luce come la manifestazioni del moto delle particelle dell'etere.

Finalmente fra i precursori della termodinamica nomineremo il grande fisico e geometra Daniello Bernoulli nella cui *Hydrodynamica, seu de viribus et motibus fluidorum* alla 10ª sezione, già si intravede concepita la costituzione dei gaz come un sistema di molecole animate da velocità grandissime ed in tutte le direzioni.

In tale teoria, indicata fino dal 1738, i contemporanei di Bernoulli non videro probabilmente che un avanzo delle vecchie ipotesi cartesiane e non fu che molti anni dopo che in essa si riconobbero i germi d'una scienza novella.

Sviluppata di poi da Lesage e Prévost (2), proposta da Waterston nel 1851, ampliata da Joule (3) e da Krönig (4), ripresa da Clausius e da Clerk Maxwell (5), la costituzione dinamica dei gaz, corollario della meccanica razionale, divenne in questi tempi dominio della termodinamica.

Malgrado le idee già emesse dai fisici sulla natura del calore, sulla fine del secolo passato quei due grandi genii che furono l'autore della *Meccanica celeste* ed il fondatore della chimica moderna, non seppero rinunciare alla materialità del calorico, giacchè, nel 1780, nella loro *Mémoire sur la chaleur*, Laplace e Lavoisier discutendo le due ipotesi che si possono fare sulla natura del calore, dicevano:

« Noi non ci decideremo fra le due ipotesi precedenti; molti fenomeni sembrano favorevoli all'ultima (la dinamica) come per esempio quello del calore che si produce dallo sfregamento di due corpi solidi, ma ve ne sono altri che si spiegano più facilmente colla prima. Forse le due ipotesi hanno luogo contemporaneamente » (6).

Lungi però dall'adottare poscia questo modo di vedere, Laplace si dichiarò partigiano convinto della materialità del calorico. Forse, se la ghigliottina rivoluzionaria non gli avesse reciso il nobile capo, Lavoisier avrebbe più tardi cangiato opinione e potremmo ora annoverarlo fra i precursori della termodinamica.

Young fu il primo a revocare in dubbio il principio della materialità del calorico che Lavoisier e Laplace ammettevano (7) e, come giustamente dice Verdet (8), in questo semplice dubbio era virtualmente contenuta tutta la termodinamica.

---

(1) Il dottor Tommaso Young, nato il 13 Giugno 1773, morto il 10 Maggio 1829, fu uno degli spiriti più profondi e più acuti dell'Inghilterra; è a Young che la fisica deve la scoperta del fatto fondamentale delle interferenze della luce.
(2) *Deux traités de Physique mécanique* — Genève 1818.
(3) *Philosophical Magazine* — II 1857.
(4) *Poggendorff's Annalen* — 1856.
(5) *Philosophical Magazine* — Gennaio e Luglio 1860.
(6) *Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris* — 1780 pag. 357-358.
(7) *Lectures on natural philosophy* — 1807 — t. I p. 651.
(8) Verdet — *Exposé de la théorie mécanique de la chaleur* — Deux leçons professées à la Société Chimique de Paris le 7 et le 21 Février 1862.

Capitolo II

Rumford — Davy — Montgolfier.

1780-1800

Perchè la teoria della materialità del calorico venisse abbandonata, mancava una grande esperienza la quale in modo evidente ed irrefutabile ne dimostrasse l'inconsistenza.

A distruggere questa teoria, che l'autore della *Meccanica Celeste* così facilmente adottava, sorsero, sulla fine del XVIII secolo, due decisive e famose esperienze, sono quelle di Rumford (1) e di Davy (2) sul calore sviluppato dall'attrito.

Fu, come racconta egli stesso (3), la lettura del trattato di Boerhaave sul fuoco quella che fece al giovine Rumford, in età allora di 17 anni, prender passione allo studio del calore, studio nel quale rese sì celebre il suo nome.

Nel 1778, occupato ad esperienze che avevano per iscopo la determinazione, mediante il rinculo del cannone, della velocità con cui una palla veniva lanciata, Rumford dovette incominciare dal determinare di quanto il peso della polvere che veniva impiegata per caricare la palla contribuisse al rinculo (4). Per risolvere questa questione, Rumford fece varie esperienze successive colla stessa carica di polvere, ora senza palla, ora con una, due, tre ed anche quattro palle, collocate l'una sull'altra.

« Aveva l'abitudine (dice Rumford) di prender con la mano sinistra la canna subito dopo ogni scarica per tener la pistola finchè l'assistente la puliva con una bacchetta coperta di stoppa, ed era molto sorpreso di trovare che la canna era molto più calda per l'esplosione d'una data carica di polvere quando non v'era palla davanti la polvere che quando una o più palle erano scacciate dalla carica. Fino allora avevo riguardato il calore ch'è acquistato dalle armi da fuoco, quando è scaricata, come proveniente immediatamente da quello che risulta dalla combustione della polvere, comunicato dalla fiamma; ma il risultato di questa esperienza mi fece vedere che questa opinione era interamente erronea » (5).

Un tal fatto, incompatibile coll'ipotesi della materialità del calorico fece impressione a Rumford il quale volle allora incominciare una serie di esperienze su ciò che di poi fu detto *calorico specifico*. La guerra di America, cui Rumford corse a prender parte, gl'impedì di attuare il suo progetto, ritornato nel 1783 in Inghilterra, ove fu uno dei fondatori della *Royal Istitution*, egli seppe che Wilke in Svezia aveva eseguito precisamente le esperienze che gli aveva ideato di intraprendere, laonde più non se ne occupò.

---

(1) Il nome e titolo di conte di Rumford gli furono dati in ricompensa dei suoi servigi; il suo nome era Benjamin Thompson. Quando le colonie inglesi si rivoltarono in America egli fu costretto ad esiliare in Europa lasciando a Rumford nel New Hampshire sua moglie e sua figlia. Egli introdusse in Baviera delle importanti riforme.

(2) Humphry Davy nato in Cornovaglia il 17 decembre 1778, morto in Ginevra il 28 Maggio 1829.

(3) Rumford — *Notice historique des diverses expériences sur la chaleur* nella sua *Mémoires sur la chaleur* — Paris — Didot — 1804 p. VII.

(4) I dettagli di questa esperienza si trovano nelle *Philosophical Transactions* — t. LXXI e nei *Philosophical Papers* — London 1802 t. I.

(5) Rumford — *Notice historique*, l. c. p. IX.

Digitized by Google

È a notarsi che non essendosi tenuto conto della perdita di calore per irradiazione e per evaporazione, perdita che deve esser stata considerevole in causa dell'alta temperatura e della durata dell'esperienza, il valore trovato per E è troppo grande, come RUMFORD stesso ha avvertito, esso non cessa però dall'essere un rimarchevole risultato.

Dopo di aver descritte nelle sue memorie le accennate esperienze, RUMFORD dice che si potrebbe utilizzare il calore sviluppato dallo sfregamento per far cuocere gli alimenti, ma, soggiunge, vi sarebbe maggiore economia a produrre questo calore servendosi come combustibile delle materie impiegate a nutrire il cavallo destinato a far muovere la macchina. (1)

Due anni dopo le suddette esperienze, RUMFORD si trovava nella Scozia ove con HOPE, PLAYFAIR e STEWART, professori nell'Università di Edimbourg, ripetè le esperienze di PICTET sulla condensazione e concentrazione delle influenze calorifiche dei corpi freddi. fu allora che per la prima volta RUMFORD annunziò pubblicamente la sua opinione sulla natura del calore con queste parole:

« Caloric has certainly no real existence. The communication of heat seems to me to be perfectly analogous to the communication of sound. The cold body in the one focus obliges the warmer body (the thermometer), in the other to change its note. » (2)

Nel 1803 RUMFORD era di nuovo a Monaco a proseguire le sue belle ricerche sul calorico raggiante (3). Sulla fine della descrizione delle sue esperienze, egli dice:

« Non posso impedirmi di osservare che è molto difficile, parmi, di accordare alcuno dei risultati di cui abbiamo fatto parola, colle opinioni dei chimici moderni sulla materialità del calorico. » (4)

Un anno dopo RUMFORD un'altra esperienza, forse più convincente, aveva luogo per opera dell'illustre DAVY il quale adottando (5) l'opinione espressa da RUMFORD, la convalidava coll'esperienza seguente: fregò l'un contro l'altro due pezzi di ghiaccio fino a che fossero ridotti, quasi totalmente, in acqua che risultò un po' al di sopra del punto di congelazione.

« Questa esperienza dimostra evidentemente, dice DAVY, che il ghiaccio fu convertito in acqua per l'attrito, poichè, dietro le ipotesi ammesse, la sua capacità avrebbe dovuto diminuire, ma è un fatto ben noto che la capacità dell'acqua pel calore è

---

(1) PICTET, parlando di RUMFORD, fa rimarcare che vi sarebbe un vantaggio reale nel produrre calore collo sfregamento se si utilizzasse una forza naturale come l'acqua od il vento. Tale idea fu applicata in America ove si costruirono stufe con piastre di ferro e di ghisa girando e sfregandosi l'una sull'altra.
Il riscaldamento coll'attrito fu felicemente attuato da BEAUMONT e MAYER nel loro apparecchio immaginato da essi presentato all'Accademia delle Scienze di Parigi nel 1850 (*Comptes Rendus* t. XXXI p. 314). Questo bell'esempio della trasformazione del lavoro meccanico in calore fu molto ammirato alla Esposizione del 1855.

(2) « Il calore non può avere un'esistenza reale. La comunicazione del calore mi pare esser analoga a quella del suono. Il corpo freddo in uno dei fuochi (degli specchi ustori) obbliga il corpo caldo (il termometro) che si trova nell'altro, a cambiare la sua nota ».

(3) RUMFORD. — *Mémoires sur la chaleur* — Paris — Didot — An XIII (1804) in cui è contenuta la *Notice historique* già citata, le sue *Recherches sur la nature de la chaleur et la manière dont elle se propage* ed una *Memoire sur la chaleur* letta da lui all'*Institut National* il 9 nevoso dell'an XII (25 Giugno 1804).

(4) RUMFORD. — *Recherches sur la chaleur* etc. nelle *Mémoires* qui sopra citate p. 96.

(5) DAVY. *Researches on heat, light and respiration* nella *Contributions to physical and medical knowledge* etc. raccolte dal D. TOMMASO BEDDOES — Bristol — 1799.

Digitized by Google

d'acqua maggiore di quella del ghiaccio (1), e che il ghiaccio dava sempre una data quantità di calore prima di convertirsi in acqua. Ne consegue che lo sfregamento non diminuisce la capacità dei corpi pel calore.

Onde riconoscere poi se una parte di calore non fosse stata sottratta dai corpi circostanti, DAVY dispose due pezzi di metallo in modo che si fregassero l'uno sull'altro, per mezzo d'un movimento d'orologeria. L'apparecchio venne collocato in un masso di ghiaccio alla superficie del quale DAVY aveva praticata una scanalatura che riempì di acqua allo stato liquido; il tutto fu collocato in un recipiente dove fece il vuoto mediante l'assorbimento del gaz acido carbonico dalla potassa caustica. Anche qui del calore fu sviluppato dall'attrito e non si poteva credere che esso provenisse dal ghiaccio, giacchè l'acqua in contatto con esso non era ghiacciata, nè dai corpi circostanti, giacchè questo calore avrebbe dovuto, passando attraverso al ghiaccio, fonderlo, il che non avvenne non essendosi il suo stato menomamente alterato. La quantità di calore sviluppata era eguale al peso del ghiaccio moltiplicato per 79°.

« Il calore adunque, conchiude DAVY, ovvero quella potenza che impedisce alle molecole dei corpi di arrivare all'immediato contatto e che è la causa delle nostre sensazioni di caldo e di freddo, può spiegarsi come essendo un moto particolare, probabilmente vibratorio, tendente ad allontanare le molecole le une dalle altre. »

Il rimanente del trattato di DAVY, per quanto riguarda il calore è consacrato alle leggi di comunicazione di esso e vi è dimostrato che esse sono interamente analoghe a quelle che reggono la comunicazione del moto.

Non fu però che nel 1812, nella sua *Chemical Philosophy*, che DAVY enunciò nettamente questa importante proposizione:

« La causa immediata dei fenomeni del calore è adunque il moto, e le leggi della sua comunicazione sono esattamente le stesse di quelle del moto. » (2)

L'accennata esperienza di DAVY (3), precisa e decisiva, è una prova novella del come il metodo sperimentale sia la via sicura che ci fa risalire a quei fatti che si chiamano elementari pel solo motivo che essi sono comuni ad un grande numero di fatti complessi e gli ultimi a cui arrivi la nostra analisi.

Fra i contemporanei di RUMFORD e di DAVY il solo YOUNG pare aver compreso tutta la portata delle loro esperienze che egli ha ravvicinate alle immortali sue scoperte sulla natura della luce, raggiungendo quasi il vero principio della Termodinamica (4).

Finalmente nel 1800, MONTGOLFIER, come risulta da documenti pubblicati nel 1839 dal suo nipote MARCO SÉGUIN (5), di cui avremo occasione di parlare più avanti, pel primo considerò il calore come capace di trasformarsi in lavoro meccanico e viceversa. Egli immaginò un *pyro-ariete* nel quale il moto era prodotto da una quantità costante d'aria che egli riscaldava per aumentarne la elasticità ed alla quale si restituiva il calore perduto durante l'espansione, onde farla nuovamente agire.

---

(1) È noto che il ghiaccio possiede una capacità pel calore che è meno della metà di quella che possiede l'acqua liquida.

(2) DAVY. — *Elements of Chemical Philosophy* p. 94.

(3) Si può trovare un dettagliato estratto delle esperienze di DAVY nel TYNDALL — *La chal. consid. comme un mode de mouvement*, trad. dall'A. MOIGNO — Parigi 1864 pagina 41.

(4) YOUNG — *Lectures on Natural Philosophy* — 1807 t. I p. 651.

(5) SEGUIN aîné — *Études sur l'influence des chemins de fer* — Paris 1839.

Ma queste idee di MONTGOLFIER che erano in contraddizione colle dottrine in allora regnanti sul modo di agire del vapore nelle macchine a fuoco, passarono inosservate, ed il nome dell'inventore del *pyro-ariete* non passò alla posterità che in grazia dei suoi aerostati.

Al fondamento della termodinamica mancava uno spirito ardito ed intelligente che applicasse la scienza del moto agli effetti prodotti dal calore. Questo spirito originale non tardò a comparire e fu SADI CARNOT.

Capitolo III

CARNOT E CLAPEYRON

1824-1834

Il 1° giugno 1796, nel palazzo del Luxembourg, che l'illustre politico generale Lorenzo Nicola Carnot, che fu poi ministro di Bonaparte, abitava come membro del Direttorio esecutivo, nacque NICOLA LEONARDO CARNOT, cui, per seguir l'uso adottato all'epoca della rivoluzione francese di scegliere i nomi di battesimo nella storia delle antiche repubbliche, veniva imposto il nome di SADI tolto da quello d'un saggio dell'Oriente.

Nel 1812 il giovinetto SADI CARNOT entrava alla Scuola Politecnica per sortirne, nel 1814, ufficiale del genio e per fare le prime sue armi alla Butte-Chaumont.

Cinque anni dopo, SADI CARNOT desioso di occuparsi di lavori scientifici più che delle armi, ritornava a Parigi per pubblicarvi, nel 1824, le sue *Reflexions sur la force motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* — Paris — Bachelier — in 8° — profondo e prezioso lavoro che in sole 118 pagine comprende le idee che formano il nodo della termodinamica.

Otto anni dopo, sorpreso da una febbre scarlattina, SADI CARNOT soccombeva, il 24 agosto 1832, ad un attacco di cholera (1).

Nelle sue *Réflexions* ecc., CARNOT cercava di scoprire in qual modo il calore produce un effetto meccanico, ma soggiogato dalle idee allora inveterate, egli ammetteva o si fondava sulle materialità del calorico, e per conseguenza sulla sua indistruttibilità.

Tale credenza lo condusse a dire che quando una certa quantità di calore passa da un corpo caldo ad uno più freddo, nel funzionare d'una macchina termica, in questo passaggio si guadagna un lavoro compiuto ma non appena l'equilibrio è stabilito, il calore perduto da l'un corpo deve

(1) Parecchi autori italiani hanno sovente confuso il figlio Carnot col padre noto per aver per tutte opere di geometria e di arte militare e fra essi il MATTEUCCI il quale nelle sue *Cinque lezioni sulle teorie d'[illegible] del calore* ecc. — Torino, Franco 1864, pag. 6, dice: *Carnot, celebre geometra e ministro della guerra sotto la rivoluzione del 1789 sotto il Consolato e nei Cento giorni, è forse quello che diede i primi [illegible] della teoria dinamica del calore* ecc. ed è perciò che stimo [illegible] la *Notice biographique sur Sadi Carnot* che l'egregio [illegible] pubblicava negli *Atti della R. Accademia delle Scienze di Torino* — Dicembre 18[illegible] — dalla quale abbiamo tolte i precedenti cenni biografici.

Digitized by Google

ritrovarsi tutto e per intero nell'altro, appunto come l'acqua che ha messo in moto la ruota idraulica si ritrova tutta nel canale a valle. Il fluido scende da un corpo più alto (in temperatura) verso un corpo inferiore e produce, con tale transito, la potenza motrice

« La produzione della potenza motrice, dice CARNOT, è dovuta nelle macchine a vapore non ad un reale consumo di calore, ma al suo trasporto da un corpo caldo ad un corpo freddo, cioè al suo ristabilimento di equilibrio, equilibrio supposto rotto per una qualche causa » (1)

Questo principio è assolutamente erroneo, la macchina a vapore rendendo al condensatore tutto il calore che ha ricevuto dal combustibile, prenderebbe la sua forza dal nulla, giacchè nulla di calore si è consumato.

Malgrado tale errore fondamentale, cagionato dalla ignoranza in cui era CARNOT del primo principio fondamentale di termodinamica, quello dell'equivalenza, che MAYER scoprì vent'anni circa dopo lui, e nel quale egli non sarebbe caduto se avesse sottoposto le sue idee all'esperienza, le sue *Réflexions* ecc. sono tanto ricche di ingegnose ed originali idee quanto sono piccole di volume. In esse si contengono i metodi di ragionamento di cui la nuova scienza fa tuttora un uso continuo, in esse, per la prima volta, sono trasportati i principii della meccanica nella scienza del calore, in esse si trovano i primi esempi di quei *cicli* di operazioni che prendendo un corpo in un determinato stato, e facendolo passare ad uno stato differente, seguendo un certo cammino, lo riconducono, per altra via, nel suo stato primitivo, modo questo di ragionamento sì nuovo e sì fecondo; in esse si trova dedotto il carattere distintivo che, perchè una macchina sia perfetta, il ciclo d'operazioni deve essere invertibile, in esse, infine, benchè ragionasse sopra un concetto tutto diverso dall'attuale sulla natura del calore, CARNOT addita la via a seguirsi per giungere al secondo principio fondamentale di termodinamica:

Il lavoro prodotto è direttamente proporzionale alla caduta del calore ed inversamente proporzionale alla temperatura assoluta

principio che essendo conseguenza immediata dei ragionamenti di CARNOT, porta giustamente il suo nome, principio che, congiunto a quello di MAYER, servì ad elevare il superbo edificio della teoria meccanica del calore.

Se CARNOT avesse rifiutato l'ipotesi della materialità del calore, s'egli avesse intraveduto il principio dell'equivalenza, il che forse egli avrebbe potuto fare se una morte troppo prematura non lo avesse rapito alla scienza, egli sarebbe andato più lungi assai e la termodinamica avrebbe avuto nel 1824 il suo completo fondamento.

« È questo un istruttivo esempio, osserva giustamente SAINT-ROBERT, dei pericoli inerenti alle ipotesi. — Esse sono utili in certi casi, ma non bisogna rendersene schiavi. Le esperienze di RUMFORD e DAVY avrebbero dovuto aprir gli occhi ai dotti, ma è tanto difficile di sortire dalla fossa in cui si è caduti che perfino gli spiriti eletti rassomigliano qualche volta alle pecore di Panurgo » (2)

L'opera di CARNOT fu resa assai più chiara, tradotta in modo analitico e rappresentata graficamente da CLAPEYRON (3) nel 1834 (4) in un modo che dopo lui fu adottato da quasi tutti gli autori

---

(1) S. CARNOT — *Réflexions sur la puissance* ecc. l. c. p. 10 e 11.
(2) *Notice biographique* ecc. l. c.
(3) BENOIT PIERRE EMILE CLAPEYRON, ingegnere delle miniere, nato in Parigi il 26 gennaio 1799, morto il 28 gennaio 1864.
(4) *Journal de l'Ecole Polytechnique* — t. XIV. 1834 — *Poggendorff's Annalen* — t. LIX — *Scientific Memoirs* — t. I.

La vera logica della termodinamica fu creata da CARNOT e quando, più tardi e per l'opera di tanti illustri, i veri principii furono scoperti, non ci fu altro a fare che ad introdurli nelle forme di questa logica, ed è certo che senza i lavori di CARNOT e quelli del suo commentatore CLAPEYRON non sarebbero stati in appresso sì rapidi i progressi della termodinamica.

Capitolo IV.

SEGUIN — MAYER — COLDING.

1839-1843

Per ordine di data deve ora avere un posto nella storia della termodinamica il signor MARCO SEGUIN il quale, come già abbiamo detto nel 1839 pubblicò i suoi *Etudes sur l'influence des chemins de fer*, opera più di economia politica che di fisica, lavoro, dice il Prof. TAIT (1), veramente curioso.

Depositario delle idee di MONTGOLFIER, suo zio, SEGUIN fa in questa sua opera notare l'errore in cui era caduto CARNOT:

« Se nelle macchine a vapore la quantità di calore ricevuta dall'acqua nella caldaia si ritrovasse tutta intera nell'acqua fredda del condensatore, come lo vorrebbe SADI CARNOT, una stessa quantità di calore produrrebbe una quantità indefinita d'azione meccanica, il che è assurdo; pare più naturale supporre che una certa quantità di calorico sparisca nell'atto stesso della produzione della potenza meccanica e reciprocamente » (2).

Ed aggiunge con MONTGOLFIER:

« La forza che apparisce durante l'abbassamento della temperatura d'un gas che si dilata è la misura e la rappresentazione di questa diminuzione di calore ».

SEGUIN fece anche numerose ma non decisive esperienze fondandosi sul principio che il lavoro prodotto da un corpo che si dilata e che, per conseguenza, perde del calore, è l'equivalente del calore perduto, non facendo però alcuna restrizione circa la sostanza sulla quale si può esperimentare. In una nota posteriore (3) SEGUIN coi dati di esse deduce per l'equivalente meccanico del calore il valore

E = 449 Chilogrammetri

Dopo SEGUIN, lasciando trascorrere lo spazio di circa tre anni, noi ci troviamo nel 1842 ed in presenza di MAYER dalla cui mente uscirono i primi e precipui fondamenti della moderna termologia.

Senza alcun impulso esterno, senza alcuna idea preconcetta, nell'esercizio della sua arte salutare, GIULIO ROBERTO MAYER, medico di Heil-

(1) TAIT — *Esquisse historique de la théorie dynamique de la chaleur* — trad. dall'A. Moigno — Paris 1870 p. 24.
(2) SEGUIN — *Influence des chemins de fer* — p. 321.
(3) *Comptes Rendus* — t. XL — 1855 — p. 5.

Digitized by Google

bronn (1), seppe render chiaro al suo spirito originale il concetto della correlazione delle forze naturali.

Nel 1840, a Giava, MAYER aveva praticato un salasso ad un europeo malato di febbre e l'osservazione da lui fatta che il sangue venoso nelle calde regioni dei tropici era d'un rosso assai più vivo e brillante di quel che non lo fosse nelle regioni più fredde, portò le sue riflessioni sulla teoria dei fenomeni respiratori e fu quello che lo avviò sulla strada della scoperta del primo principio fondamentale di termodinamica cui legò il suo nome.

Nel maggio 1842 comparve la prima memoria di MAYER col titolo: *Osservazioni sulle forze della natura inanimata* (2) nella quale per la prima volta era enunciato il principio della equivalenza fra il calore ed il lavoro meccanico, dedotto dallo studio comparato dell'attrito, delle macchine a vapore e delle proprietà dei gaz. Le idee che MAYER enunteva in questa sua opera furono trovate sì strane che l'autore fu tenuto per pazzo!

Nelle poche pagine invece di questa memoria si contengono i più interessanti teoremi. MAYER mostrò che si può elevare la temperatura dell'acqua contenuta in un vaso spendendo lavoro coll'agitarla. Egli riuscì ad innalzare la temperatura d'una massa d'acqua da 12° a 13° cent. colla semplice agitazione e ne conchiuse che si doveva poter convertire del ghiaccio in acqua comprimendolo fortemente. Tale previsione fu più tardi confermata dalle esperienze di MOUSSON (3).

Alla fine della sua memoria, MAYER dice categoricamente:

« Bisogna che nel determinare l'altezza alla quale si deve elevare un dato peso perchè il lavoro che esso può produrre cadendo sia equivalente al riscaldamento d'un eguale peso d'acqua da zero ad un grado centigrado. »

Coi dati conosciuti a quell'epoca, (valendosi per la differenza dei due calori specifici d'un gaz a pressione costante ed a volume costante), il prodotto della pressione atmosferica pel coefficiente di dilatazione del gaz, MAYER valutò quell'altezza a 365 metri, quindi il primo valore dell'equivalente meccanico del calore trovato da MAYER fu:

$$E = 365 \text{ Chilogrammetri (4)}$$

Prima di MAYER si sapeva o si ammetteva che esiste in generale una certa relazione fra il calore ed il lavoro, ma fu MAYER quello che pel primo sostenne che il lavoro creato per il compimento di un certo lavoro è proporzionale al lavoro speso, che l'una di queste quantità può essere misurata direttamente dall'altra (5), formulando il principio fondamentale su cui riposa tutta la nuova dottrina.

Le altre successive memorie pubblicate da MAYER sono: *Il movimento organico nei suoi rapporti colla nutrizione* (6) colla quale fece fare un

(1) Nato il 25 novembre 1814 in Heilbronn nel Wurtemberg. — Vedi la bella biografia di MAYER che il Conte de Saint-Robert ha pubblicato nella seconda edizione dei suoi *Principes de termodynamique*.

(2) *Bemerkungen über die kräfte der unbelebten Natur* negli *Ann. der Chemie und Pharmacie* di WÖHLER e LIEBIG t. XLII 1842. — *Phil. Mag.* quarta serie t. XXIV.

(3) *Poggendorff's Annalen* t. CV. — *Ann. de ch. et de ph.* 1859 t. LVI.

(4) Questo risultato numerico si scosta assai dal vero in causa dei valori ancora inesattamente determinati del coefficiente di dilatazione e del calore specifico dei gaz che si avevano nelle scienze a quell'epoca.

(5) ZEUNER. — *Théorie mécanique de la chaleur* — trad. de M. ARNTHAL e A. CAZIN Paris 1869 pag. 15 e 16.

(6) *Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel.* — Heilbronn 1845.

gran passo alla fisiologia introducendovi le idee di lavoro e di calore sviluppato dalle azioni chimiche nel corpo umano ed applicando così, nel modo il più audace ed il più preciso, la teoria meccanica del calore all'energia vitale — *L'introduzione alla meccanica del cielo* (1) applicazione della nuova dottrina all'astronomia — *Osservazioni sull'equivalente meccanico del calore* (2), memorie tutte le quali mostrano che, malgrado una imperfetta educazione scientifica sopra certi punti, MAYER comprendeva tutta la portata della sua scoperta (3).

Un altro fisico i cui lavori sono pochissimo conosciuti deve trovare il suo posto in questa storia ed è il signor COLDING, (4) ingegnere delle acque della città di Copenhagen il quale presentò alla Società Reale di Danimarca una serie di memorie le quali contenevano sulla potenza delle macchine a vapore ed a gas delle idee quasi identiche a quelle di MAYER, e che furono pubblicate nelle memorie di quella Società nel 1843.

È a notarsi però che i lavori di COLDING furono da lui presentati molti anni prima del 1843 e che, scritti in danese, lingua la cui conoscenza è poco sparsa, non furono abbastanza noti e non fruttarono al loro autore il dovuto merito.

L'ingegnere COLDING, con alcune esperienze sull'attrito determinò per l'equivalente meccanico del calore:

$$E = 350 \text{ Chgm}$$

valore assai inferiore al vero ma tuttavia rimarchevole quale uno dei primi calcolati (5) e bastevole ad assicurare al nome di COLDING un posto fra quelli degli autori che collaborarono alla determinazione dell'equivalente dinamico.

Capitolo V.

JOULE

1843-1850

Nella storia della termodinamica si presenta ora il glorioso nome di JOULE (6) l'uomo che più di tutti ha contribuito alla creazione della nuova teoria, l'uomo che consacrò vent'anni almeno della sua vita alla determi-

---

(1) *Beiträge zur Dynamik des Himmels* — Heilbronn 1848 — *Philosophical Magazine* quarta serie t. XXV.

(2) *Bemerkungen über das mechanische Aequivalent der Wärme* — Heilbronn 1851 — *Phil. Mag.* quarta serie t. XXV.

(3) Il prof. TYNDALL nel sunto da lui dato nel *Phil. Mag.* quarta serie t. XXVIII 1864 pag. 25 ... dei lavori di MAYER ne sostiene pure i diritti e ne propugna la causa come pure il LABOULAYE negli *Annales du Cons. d'Arts et Met.* t. V. — L'ingegnere [illegible] ha pubblicato recentemente una pregevole traduzione degli scritti di MAYER sotto il titolo *Meccanica del calore* 1869 Torino Ermanno Loescher.

(4) COLDING LUDWIG AUGUST — *Nogle Sætninger om Kræfterne* — Acc. della Scienze di Copenhagen 1843.

(5) Il prof. TAIT nella sua *Esquisse Historique* etc. l. c. pag. 27 dice che questo valore di E trovato da COLDING non è paragonabile per esattezza con quello trovato da JOULE nello stesso caso. Che non sia paragonabile è vero ma in quanto all'esser stato calcolato nello stesso anno è a notarsi come già abbiamo detto che le memorie di COLDING furono pubblicate varii anni dopo la presentazione che ne aveva fatto l'autore alla Società di Danimarca, quindi il valore di E trovato da COLDING è anteriore, almeno di qualche anno, al 1843.

(6) JOULE JAMES PRESCOTT nato a Manchester nel 1818. È membro corrispondente della R. Accademia delle Scienze di Torino.

Digitized by Google

nazione dell'equivalente meccanico del calore, l'uomo il quale coi procedimenti i più svariati, i più minuti, i più precisi ha, con una costanza degna del più gran plauso, ottenuto coll'esperienza quanto poi fu confermato dal calcolo, l'uomo infine che pel primo vide l'applicazione feconda della teoria meccanica del calore ai motori ed alla fisiologia animale.

Le leggi di FARADAY sull'equivalenza fra l'affinità chimica e l'elettricità, le sue scoperte sull'elettro-magnetismo servirono di punto di partenza a JOULE, il quale incominciò nel 1843 la prima serie de' suoi lavori sopra una macchina magneto-elettrica cominciando dal dimostrare applicabile alle correnti magneto-elettriche una legge ch'egli aveva dapprima dimostrato per le correnti voltaiche ordinarie e che da CLAUSIUS fu dimostrata matematicamente, quella cioè che la quantità di calore sviluppata da una corrente che attraversa un dato filo conduttore è proporzionale al quadrato della sua intensità (1). Con questa legge JOULE misura la quantità di calore che sviluppa una corrente d'induzione generata da un conduttore mobile che forma parte di un circuito chiuso, e che si muove in presenza d'una calamita. Determina infine quale sia il lavoro meccanico necessario a produrre il movimento cui è dovuta la corrente di induzione che genera il calore.

Questi esperimenti però intorno agli effetti caloriferi dell'elettro-magnetismo, osserva il Prof. TURAZZA (2), sebbene meravigliosamente atti alla dimostrazione del fatto fondamentale della termodinamica, non sono però i meglio adatti alla determinazione dell'equivalente meccanico in causa dell'incertezza piuttosto considerevole dei dati relativi. Molto meglio si prestano le esperienze posteriori di JOULE sull'attrito e sulla condensazione e rarefazione dell'aria.

Nelle citate esperienze sugli effetti termici delle correnti magneto-elettriche il valor medio trovato da JOULE per l'equivalente fu di 838 piedi-libbre (3) cioè è:

$$E = 459,\ 87\ \text{Chgm.}$$

valore troppo grande e superiore di 8 e 1|2 per cento a quello più probabile da JOULE stesso determinato più tardi. La difficoltà di misurare in parte il calore totale assorbito dalla grande elettro-calamita e l'imperfezione dei primi apparecchi sono le ragioni della poca esattezza di questo primo risultato.

Queste esperienze di JOULE furono da lui comunicate all'Associazione Britannica riunita a Cork e pubblicate nel 1843.

Nello stesso anno JOULE applicò ai fenomeni vitali i principi di termodinamica.

La seconda serie di esperienze fu intrapresa da JOULE nel 1844-1845 ed è pubblicata nel *Philosophical Magazine* (4); il principio teorico su cui

---

(1) *Archives de l'électricité* t. II 1842 pag. 54. — Questa memoria del fisico inglese fu completata dagli studi di E. BECQUEREL (*Annales de chimie et de physique* 1843 terza serie t. IX), di FAVRE (*Ann. de chim. et de phys.* 1854 terza serie t. XL), di G. BECQUEREL (*Recherches sur les forces électromotrices*. Paris 1855), di MARIÉ-DAVY e TROOST (*Ann. de ch. et de phys.* 1858 terza serie t. LIII).

(2) TURAZZA. — *Teoria dinamica del calore*. — *Memorie dell'Istituto Veneto di Sc. Lett. ed Arti* t. VIII. — *Nuovo Cimento* Anno VI t. XII p. 246.

(3) JOULE. — *On the Calorific Effects of Magneto-Electricity and on the Mechanical Value of Heat* nel *Phil. Mag.* t. XXIII ottobre, novembre e dicembre 1843. — Vedasene anche un sunto nel *Nuovo Cimento* t. 13 p. 1855 p. 62.

(4) JOULE. — *On the Changes of Temperature produced by the Rarefaction and Condensation of Air.* — *Phil. Mag.* 1845 terza serie t. XXVI. — *Ann. de ch. et de phys.* terza serie t. XXXV p. 118 vedine una traduzione nel LABOULAYE. — *Annales du Cons. Imp. d'Arts et Métiers* t. II 1862 pag. 688.

si fondano queste esperienze è di misurare il calore generato nella compressione dell'aria o perduto nella rarefazione e di confrontarlo col corrispondente lavoro speso o guadagnato (1)

Mediante la compressione dell'aria, in due serie di esperienze, JOULE trovò

$$\mathrm{E} = 452,52 \text{ Chgm. ed } \mathrm{E} = 437,20 \text{ Chgm}$$

Mediante la dilatazione dell'aria, in tre serie di esperienze, trovò

$$\mathrm{E} = 450,87, \quad \mathrm{E} = 447,58, \quad \mathrm{E} = 417,96.$$

La terza serie di esperienze fu eseguita da JOULE nel 1849 ed è pubblicata nelle *Transazioni filosofiche* (2) In essa l'autore dà un esteso ragguaglio degli svariati suoi esperimenti i quali ebbero per iscopo di misurare il lavoro speso sia nell'agitare un liquido, sia nel soffregare due corpi, ed il corrispondente aumento di temperatura. Da questo confronto JOULE dedusse per valore dell'equivalente

Agitando dell'acqua, media di 40 esperienze 773, 640 piedi-libbre, cioè

$$\mathrm{E} = 424,338 \text{ Chgm}$$

Agitando del mercurio, media di 50 esperienze 775, 032 piedi-libbre, cioè

$$\mathrm{E} = 425,322 \text{ Chgm}$$

Sfregando ghisa con ghisa, media di 20 esperienze 775, 938 piedi-libbre, cioè

$$\mathrm{E} = 4[illegible], 738 \text{ Chgm}$$

La grande prossimità di questi risultati dimostra ampiamente che il lavoro meccanico consumato a produrre una unità di calore è costante qualunque sieno i corpi sottoposti alla esperienza.

Oltre a questi, più speciali al nostro soggetto, molti altri sono i lavori di termodinamica che noi dobbiamo a JOULE, alcuni fra i quali furono fatti in compagnia di WILLIAM THOMSON

Capitolo VI

HIRN

1857 — 1865

Il Comitato di Meccanica della Società industriale di Mulhouse aveva incaricato l'ingegnere civile GUSTAVO ADOLFO HIRN, di Logelbach presso

(1) Vedi la descrizione di queste esperienze nella *Parte seconda*, Capitolo II.

(2) JOULE — *On the Mechanical Equivalent of Heat* — *Phil. Trans. of the Roy. Soc.* London 1850 Parte I p. 61 — *Ann. de chim. et de phys.* terza serie t. XXXV p. 121 vedi anche una traduzione che ne fece il LABOULAYE negli *Ann. du Cons.* I e t. II 1862 pag. 665

Colmar, di fare un saggio degli oli e grassi serventi a lubrificare gli organi delle macchine per attenuarne gli attriti. HIRN si applicò a tali ricerche e nel gennaio del 1855 comparve la sua memoria su tale soggetto (1).

Risultato industriale di questo lavoro dell'ingegnere HIRN fu l'introduzione nella pratica degli oli minerali che si credevano impropri a lubrificare le macchine. Risultato scientifico fu di mettere in evidenza in una maniera non dubbia la proporzionalità fra il lavoro speso ed il calore prodotto.

Nel 1856 la Società di Fisica di Berlino propose un premio per chi avesse determinato un valore esatto dell'equivalente meccanico del calore. HIRN intraprese allora nuove ricerche le quali, unitamente alle già citate, formarono la memoria che egli inviò a Berlino per concorrere al premio, nella quale si contenevano le sue esperienze sull'attrito dei solidi, dell'acqua, sulla disaggregazione dei corpi, lo schiacciamento del piombo, etc.

Con queste esperienze HIRN trovò molti valori per l'equivalente meccanico che si trovano registrati nelle tavole annesse alla memoria di HIRN, *Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur*, pubblicata nel 1858.

In quella parte però delle esperienze che si riferisce al lavoro delle macchine a vapore, HIRN errava nei suoi ragionamenti e trovava per **E** valori troppo piccoli ed assai sconcordanti.

CLAUSIUS, incaricato dalla Società di Fisica di Berlino di esaminare la memoria di HIRN, segnalò questi errori nel suo rapporto facendo nello stesso tempo un'esatta interpretazione delle esperienze dell'ingegnere di Colmar. Questi però non si arrese sulle prime alle osservazioni di CLAUSIUS e nelle sue *Recherches* etc., citate più sopra, benchè vi unisse il rapporto di CLAUSIUS, mantenne la legittimità dei suoi primi calcoli cercando anzi, con nuove esperienze, di giustificarla.

Tuttavia nel 1862, nella sua *Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur*, HIRN si arrese alle osservazioni di CLAUSIUS e, riconosciuto l'errore de' suoi primitivi calcoli, formulò in modo diverso e più esatto le sue conclusioni, ottenendo in media

$$E = 413 \text{ Chgm.}$$

Finalmente, nel 1865, HIRN pubblicò una nuova e completa edizione de' suoi lavori sotto il titolo *Théorie mécanique de la chaleur*, opera pregevolissima e che dà un saggio dell'operosità e del merito del suo autore in tante sì variate e delicate ricerche e che assegna ad HIRN un sì onorevole posto nella storia della termodinamica.

Sono anche degne d'esser ricordate alcune semplici ed elementari *Letture* che HIRN fece sulla teoria dinamica del calore alla Società delle Scienze di Colmar (2), letture che meriterebbero di esser ristampate e meglio conosciute.

Non dobbiamo infine passar sotto silenzio le esperienze che HIRN fece sulla respirazione dell'uomo. Fra le reazioni chimiche capaci di sviluppare calore nell'essere vivente, la più considerevole è quella che risulta dall'assorbimento dell'ossigeno e della sua combinazione cogli elementi combustibili formati dagli alimenti. La respirazione è causa principale della produzione del calore vitale. Questo fatto venne verificato prima da LAVOISIER e LAPLACE, poi da DULONG e REGNAULT e finalmente dalle esperienze di HIRN sull'uomo le quali misero in rilievo che da un indi-

(1) *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse* - 1855 - num 128 e 129 — *Bulletin de la Société d'Encouragement* 1855-56.
(2) *Mémoires de la Société des Sciences de Colmar* — 1864.

viduo ad un altro, il rapporto degli elementi combustibili che si combinano coll'ossigeno è invariabile. Il calore sviluppato in ogni istante nel nostro corpo è sempre rigorosamente proporzionale al peso dell'ossigeno assorbito in un dato tempo.

Con varie esperienze, sia sull'uomo che sulla donna, in riposo, sia sui giovani che sui vecchi, HIRN trovò sempre che ciascun grammo d'ossigeno assorbito produceva molto approssimativamente cinque calorie.

Collocato poi un individuo entro una gran cassa, funzionante da calorimetro ed ermeticamente chiusa, vi era impegnato a far girare continuamente una ruota effettuando così un lavoro che si poteva facilmente misurare, come pure HIRN poteva analizzare i prodotti della respirazione di quell'individuo.

Col lavoro di 33000 chilogrammetri all'ora, un uomo consumava 132 grammi d'ossigeno cioè 660 calorie. La combustione che si opera nel suo corpo equivale a quella di 833 gr. di carbone per ogni 17 ore.

Da queste esperienze che si trovano tutte descritte nelle citate *Recherches* etc. (1858), HIRN cercò di determinare il valore dell'equivalente meccanico, ma troppo incerti ne sono i risultati; esse tuttavia servirono in mirabile modo al progresso della fisiologia.

Capitolo VII.

Altri determinatori dell'equivalente meccanico del calore

HOLTZMANN — PERSON — FAVRE — LEROUX — LABOULAYE — D'ESTOCQUOIS

Dopo JOULE, HIRN e gli altri determinatori dell'equivalente meccanico del calore di cui si è trattato nei precedenti capitoli, molti altri fisici quale in un modo, quale in un altro, si applicarono alla ricerca sperimentale del valore di E.

La considerazione che una quantità di calore assorbito da un gaz può cagionare sia una elevazione di temperatura, sia una dilatazione senza elevazione di temperatura, condusse HOLTZMANN alla determinazione dell'equivalente meccanico del calore.

Nella sua opera (1) pubblicata nel 1845, HOLTZMANN prende per equivalente meccanico il lavoro prodotto dalla dilatazione di un gaz senza elevazione di temperatura e servendosi del rapporto delle due capacità calorifiche determinato da DULONG per mezzo del suono, calcola

$$E = 374 \text{ Chgm}$$

Nel 1854 il signor PERSON, professore di fisica a Besançon, pubblicò una nota sull'equivalente meccanico del calore (2), nella quale, dopo aver fatto notare che non si potrà avere un esatto valore fino a quando non si conoscerà esattamente il calore specifico c_v dell'aria a volume costante, dimostra che prendendo per c_v il valore tratto dalla formola data da LAPLACE per la correzione della velocità del suono nell'aria, si

(1) HOLTZMANN. — *Sul valore e l'elasticità dei gas e dei vapori*. — Manheim 1845. — Se ne trova anche un estratto negli *Annali di Poggendorff*.
(2) *Mémoires de la Société d'Émulation de Doubs*. — 1854. — *Comptes Rendus*. — t. XXXIX. — 1854 pag. 1131. — *L'Institut, journal des sciences*. — 1854 pag. 434.

Digitized by Google

giunge, per l'equivalente, ad un valore poco diverso da quello ottenuto da JOULE.

Un semplice ragionamento, analogo a quello fatto da MAYER, conduce PERSON ad avere, per misura del lavoro dovuto alla unità di calore, l'espressione

$$\mathbf{E} = \frac{P\alpha}{\gamma\,(c_p - c_v)}$$

(α, coefficiente di dilatazione dell'aria, P, pressione normale per metro quadrato, ρ peso del metro cubo d'aria; c_p, calore specifico a pressione costante), addottando per c_v il valore 0,16844 e per c_p il valore 0,2375 determinato da REGNAULT, l'espressione suddetta, come vedremo nella *Terza parte*, dà il valore

$$\mathbf{E} = 423{,}974 \text{ Chgm}$$

Tre anni dopo misurando il calore di una corrente speso a produrre un lavoro meccanico, FAVRE (1) giunse a trovare il valore

$$\mathbf{E} = 443 \text{ Chgm.}$$

e sperimentando l'attrito dell'acciaio (2).

$$\mathbf{E} = 413{,}2 \text{ Chgm}$$

Nello stesso anno (1857) un altro sperimentatore, LEROUX, per mezzo del calore consumato nelle macchine magneto-elettriche trovò in media

$$\mathbf{E} = 457{,}80 \text{ Chgm}$$

Un anno dopo, vale a dire nel 1858, comparve a Parigi l'*Essai sur l'équivalent mécanique de la chaleur* di LABOULAYE, nel quale l'autore per mezzo dello schiacciamento del piombo trova (3)

$$\mathbf{E} = 187 \text{ Chgm}$$

a servendosi (pag 44) della formola

$$\mathrm{C}\mathbf{E} = \mathrm{DP}\left(\frac{1}{d}\right)^{\frac{2}{3}}$$

in cui D è la dilatazione cubica d'un solido, P il peso che vi produce un permanente allungamento, d il suo peso specifico, C il suo calore specifico, trova una tabella di valori per $\mathbf{E}$ molto diversi e sconcordanti fra loro. Causa di tali errori è l'ammettere, come fa il LABOULAYE, che il lavoro interno di dilatazione sia eguale a quello d'un azione meccanica esterna producente una medesima dilatazione, ed il non tener conto dell'innalzamento di temperatura

Riprendendo più tardi, insieme a TRESCA, i suoi lavori nel 1863, il si-

---

(1) *Comptes Rendus* — t. XLV 1857 p. 53
(2) *Comptes Rendus* — t. XLVI p. 337
(3) Vedi anche *Comptes Rendus* t. XLVI pag. 773.

Digitized by Google

gnor LABOULAYE riconobbe l'errore dei suoi primi esperimenti e diede altri e più esatti valori per l'equivalente meccanico del calore (1).
Citeremo ancora il signor D'ESTOCQUOIS il quale dà il piccolo valore.

E = 175 Chgm

in una sua *Note sur l'équivalent mécanique de la chaleur* presentata all'Accademia delle Scienze di Parigi nel 1858 (2).

Capitolo VIII

Altri determinatori dell'equivalente meccanico del calore

MATTEUCCI — BÉCLARD — QUINTUS ICILIUS — BOSSCHA — MOULINE
BELLANGER — EDLUND — VIOLLE.

L'illustre e compianto nostro MATTEUCCI va anche annoverato fra gli uomini che cooperarono alla conferma sperimentale del principio dell'equivalenza. Per mezzo di un motore magneto-elettrico e misurando il lavoro equivalente al calore svolto dalle correnti indotte (3), MATTEUCCI trova in media per l'equivalente il valore

E = 438,06 Chgm

Al MATTEUCCI dobbiamo anche una bella esposizione della termodinamica inserita nell'anno terzo della *Revue des cours scientifiques*, nonchè l'aver raccolto in un piccolo libro (4) le pubbliche lezioni che egli diede in Torino nel 1864 sulla teoria meccanica del calore.

In questo libro elementare e scritto con quello stile facile e chiaro che era proprio del gran fisico pisano, sono descritte sommariamente le esperienze che svelarono l'oscuro meccanismo della respirazione muscolare. MATTEUCCI sperimentando sopra delle rane, scoprì che l'irritazione nervosa agisce eccitando nel muscolo (*gastrocnemio*) la respirazione o la combustione e che è fra questa combustione e il lavoro del muscolo che deve verificarsi il principio fondamentale della termodinamica. L'esperienza ha luminosamente confermato questo fatto, laonde conclude MATTEUCCI:

« Avevo ben ragione di dirvi che nelle funzioni di un animale, nel meccanismo per cui esso è atto a sviluppare calore e lavoro, si vedevano verificate le stesse leggi che governano la macchina a vapore e i motori elettro-magnetici, e quindi, usando, è pur lecito dedurne che le leggi fisiche e chimiche hanno nell'organismo vivente le stesse impero che hanno nei corpi inorganici » (5).

E giacchè siamo entrati a parlare dell'applicazione della termodinamica alla fisiologia, dobbiamo anche citare, benchè non determinatore spe-

(1) *Comptes Rendus* — t. LVIII — 1864 pag. 353
(2) *Comptes Rendus* — t. XLVI — pag. 671
(3) Vedi la descrizione di questa esperienza nella *Parte Seconda*, capitolo VIII
(4) MATTEUCCI — *Cinque lezioni sulla teoria dinamica del calore e sulle sue applicazioni all'affinità, alla pila, ai motori elettro-magnetici ed all'organismo vivente* — Torino, Franco 1864
(5) MATTEUCCI — *Cinque lezioni* ecc. 1. a. pag. 135 e seguenti

Digitized by Google

rimentale dell'equivalente, BÉCLARD (1) il quale con una facile esperienza alla portata di chiunque possede un buon termometro a mercurio dimostrò che quando nella contrazione muscolare si produce un effetto meccanico esterno, la variazione del termometro, collocato attraverso i tegumenti, è assai minore di quando la contrazione non è accompagnata da lavoro esterno. La sola parte adunque, conchiude BÉCLARD, della forza muscolare che non è utilizzata come lavoro meccanico è quella che appare sotto forma di calore.

Il riscaldamento d'un circuito percorso da una corrente idro-elettrica servì ad un altro esperimentatore, il signor QUINTUS ICILIUS, (2) per determinare l'equivalente.

Nel circuito, oltre la pila, era contenuto un reostato, un galvanometro di Weber ed un calorimetro consistente in un vaso di rame pieno d'acqua, e qualche volta invece, di alcool o di terebentina, collocato entro un recipiente più grande, circondato di acqua a costante temperatura. La media dei risultati ottenuti da QUINTUS ICILIUS è

$$E = 399{,}7 \text{ Chgm}$$

Un altro valore più esatto, cioè

$$E = 419{,}5 \text{ Chgm}$$

fu ottenuto da BOSSCHA misurando il calore che si sviluppa nell'intero circuito d'un elettro-motore alla Daniell.

Citeremo ancora fra i determinatori dell'equivalente meccanico del calore, il signor MOUTINE il quale nel gennaio del 1865 inviò all'Accademia delle Scienze di Parigi una sua *Note sur une expérience destinée à déterminer l'equivalent mécanique de la chaleur* alla quale fece in appresso due correzioni (3), il signor BELLANGER, il quale nella sua memoria intitolata *De l'equivalent mécanique de la chaleur* si occupò a spiegare l'anomalia che presenta una lamina di caoutchouc, la quale, stirata, si riscalda e teso da un grave e riscaldato si contrae compiendo un lavoro negativo. Finalmente citeremo il fisico svedese EDLUND, il quale sperimentando sui fili metallici ottenne

$$E = 430{,}66 \text{ Chgm.}$$

come valor medio dell'equivalente meccanico del calore.

Più recentemente (4) il signor J. VIOLLE si occupò della ricerca sperimentale dell'equivalente meccanico usando dell'apparecchio di Foucault mediante il quale un disco metallico si riscalda girando sotto l'influenza d'una elettro-calamita.

Adottando, in successive esperienze, dischi di rame, di stagno, di piombo e d'alluminio, il signor VIOLLE trovò in media

$$E = 436{,}32 \text{ Chgm}$$

---

(1) *Comptes Rendus* t. L, 1860 pag. 471
(2) *Comptes Rendus* t. XLV pag. 420 — *Pogg. Ann.* t. XXXIX pag. 377
(3) *Comptes Rendus* t. LX 1865 p. 24. Questa *Note* fu data ad esame ad una Commissione composta dei signori REGNAULT ed ENRICO SAINTE-CLAIRE DEVILLE, ma per quante ne abbia fatta ricerca non potei trovarla pubblicata, onde mi sfuggì quindi qual genere di esperienze sia quello tenuto dal signor MOUTINE
(4) *Comptes Rendus* — giugno 1870

Capitolo IX

Teoria e parte analitica.

CLAUSIUS — THOMSON — RANKINE — REECH — BOURGET
DUPRÈ — REGNAULT

Fra quelli i quali per via analitica trattarono la teoria dinamica del calore, che per mezzo del calcolo stabilirono le equazioni fondamentali e ne trassero importanti corollari, si presenta pel primo il Professore RODOLFO CLAUSIUS (1) il quale, riprendendo la teoria del calore al punto in cui l'aveva lasciata CLAPEYRON nel febbraio del 1850 lesse all'Accademia delle Scienze di Berlino la prima sua rimarchevole memoria *Sulla potenza motrice del calore* (2).

Nella prima parte di questa memoria, CLAUSIUS tratta dell'azione meccanica del calore nei gaz perfetti, facendo uso del solo primo teorema di termodinamica quello cioè dell'equivalenza, ed arriva così ad un'equazione differenziale che contiene una funzione incognita del volume o della temperatura, che egli determina pei gaz perfetti ammettendo vera l'ipotesi di MAYER che il lavoro interno nei gaz perfetti sia trascurabile. Determinata così la forma della funzione CLAUSIUS ottiene un'espressione meglio definita dell'azione meccanica nei gaz perfetti.

Nella seconda parte, CLAUSIUS, pel primo, fa uso della legge di CARNOT così modificata (3):

> « Quando un corpo sviluppa un lavoro meccanico per una serie di cangiamenti il cui modo (?) sia reversibile ed alla fine del quale esso si ritrovi al suo stato iniziale, il rapporto fra la quantità di calore, che si utilizza effettuando il lavoro, alla quantità totale di calore spesa, è funzione soltanto della temperatura per cui abbero luogo i cangiamenti. »

Fu cercando di determinare la suddetta funzione della temperatura o del volume per altri corpi che non siano i gaz perfetti e basandosi sull'assioma che il calore non può da sè medesimo passare da un corpo freddo ad uno caldo, che CLAUSIUS arrivò a questo secondo principio (4) cui più tardi diede un'altra forma chiamandolo *teorema dell'equivalenza delle trasformazioni* (5).

Molte altre memorie fecero ben presto seguito a questa e resero in breve tempo celebre il nome di CLAUSIUS il quale, se anche null'altro avesse fatto, lo sarebbe divenuto egualmente soltanto per la dimostrazione da lui data che il principio della reversibilità di CARNOT sussiste

(1) CLAUSIUS RODOLFO-GIULIO-EMMANUELE nato a Coslin in Pomerania nel 1822 — Professore a Wurtzbourg.

(2) CLAUSIUS — *Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen* — Poggendorff's Annalen t. LXXIX 1850 p. 368 e 500 — *Phil. Mag.* quarta serie t. II — *Ann. de ch. et de phys.* terza serie t. XXXV 1852 p. 482.

(3) La parola *ciclo* è la traduzione che fece COMBES dell'espressione *kreisprocess* di CLAUSIUS: vedi *Comptes Rendus* 5 marzo 1860.

(4) CLAUSIUS, anno XLI t. XXII pag. 500.

(5) *Pogg. Ann.* t. XCIII 1854 pag. 481 — *Journal de Liouville* t. XX 1855 p. 63. — *Phil. Mag.* quarta serie t. XII p. 81.

gitized by Google

sempre. Fu questo un passo della più grande importanza per la termodinamica.

Tutte queste memorie riunite furono pubblicate in Lipsia fra il 1864 ed il 1867 col titolo *Trattato sulla teoria meccanica del calore* (1) nei quali l'equivalente meccanico è determinato con due metodi diversi fondati sulle equazioni relative ai gaz ed ai vapori.

Oltre a ciò diverse note di CLAUSIUS si trovano inserite nei *Comptes Rendus* dell'Accademia delle Scienze di Parigi in risposta ad obbiezioni di REECH e di DUPRÉ.

Nel luglio 1865 (2) CLAUSIUS inviò a della Accademia una sua memoria *Sulle diverse forme, proprie alle applicazioni, che si possono dare alle equazioni fondamentali della teoria meccanica del calore*, nella quale le due equazioni che esprimono in modo generale i due teoremi principali sono trasformate in modo da corrispondere ai casi speciali che più di sovente avviene doversi considerare. Per tal modo le equazioni, le quali nella loro forma generale non sono di facile applicazione, riescono assai più comode per l'uso.

L'assioma che il calore non può passare di per sè stesso da un corpo più freddo ad uno più caldo, assioma su cui si fondano i principi dedotti da CLAUSIUS, venne mirabilmente dimostrato da un altro celebre e benemerito autore di termodinamica, il Prof. WILLIAM THOMSON in una sua memoria pubblicata nel 1851 (3).

THOMSON aveva già, due anni prima, pubblicato un *Esame della teoria della potenza motrice del calore di Carnot* (4) coi risultati numerici dedotti dalle esperienze di REGNAULT sul vapor d'acqua. La prima parte di questa memoria contiene un riassunto della teoria di CARNOT sotto la forma che le diede CLAPEYRON. THOMSON, applicando questa teoria alla compressione dei gaz, dà la formula

$$E = \frac{\mu (1 + \alpha t)}{\alpha}$$

in cui α è il coefficiente di dilatazione del gaz, t la sua temperatura e μ è la funzione di CARNOT, cioè il coefficiente $\frac{1}{C}$ di CLAPEYRON dipendente dalla temperatura e costante per tutti i corpi, coll'aiuto delle esperienze di REGNAULT sulle forze elastiche ed i calori latenti del vapor d'acqua, THOMSON dà i vari valori di μ di grado in grado.

È incontestabile che THOMSON fu il primo, dopo CLAPEYRON, a richiamare l'attenzione sull'opera di CARNOT colla suddetta memoria del 1849, egli ne sviluppò anche alcune importanti conseguenze ma non si applicò ai problemi della nuova teoria, cosa che un anno dopo, come abbiamo detto più sopra, venne fatto da CLAUSIUS.

(1) CLAUSIUS — *Abhandlungen über die Mechanische Wärmetheorie* — Il signor F. FOLIE ne ha fatto una accurata traduzione in francese: *Théorie mécanique de la chaleur*, Paris, 1868 [illegible].

(2) *Comptes Rendus* t. XLI 1865.

(3) THOMSON — *On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr. Joule's equivalent of a thermal unit and M. Regnault's observations on steam* nelle *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* t. XX parte II 1851 pag. 261 — *Journal de Liouville* t. XVII giugno 1852 — *Ann. de ch. et de phys.* terza serie t. XXXVI 1852 p. 118 — *Phil. Mag.* quarta serie t. IV 1852 p. 424.

(4) THOMSON — *An Account of Carnot's Theory of the Motive Power of Heat* — *Trans. of R. S. of Ed.* t. XVI 1849 p. 541 — *An. de ch. et de phys.* terza serie t. XXXV 1852 pag. 248.

Un metodo atto a scoprire sperimentalmente e con molta esattezza la relazione fra il calore prodotto ed il lavoro speso nella compressione di un gaz fu, nel 1851, proposto da THOMSON e due anni dopo da lui intrapreso in compagnia di JOULE (1). Questo metodo consiste nell'obbligare il gaz ad attraversare un diaframma poroso e nel osservare la temperatura dalle due parti del diaframma.

Altri e numerosi sono gli importanti lavori di cui la scienza va tributaria all'illustre professore di Glascow, la termo-elettricità, le leggi generali della trasformazione, l'azione magneto-cristallica, il principio dell'energia, la teoria meccanica dell'elettrolisi etc. sono tutti soggetti da lui profondamente studiati nello spazio di pochi anni.

Fra tutti questi suoi lavori, sparsi in diverse pubblicazioni e che sarebbe sì utile voler riunirli in collezione, citeremo la sua memoria *Sulla conservazione dell'energia solare* (2) che, proposta da MAYER ed enunciata da WATERSTON, venne in modo mirabile sviluppata da THOMSON.

Un altro celebre fondatore della termodinamica che vanta la Gran Bretagna è il sig. RANKINE (3) le cui prime ricerche sull'azione meccanica del calore comparvero in una memoria presentata alla Società Reale di Edinburgh nel dicembre 1849, letta nel febbraio 1850 e pubblicata nel 1851 (4) e si fondano su ciò ch'egli denomina l'ipotesi dei *vortici molecolari* dalla quale, appoggiandosi a noti principii dinamici, deduce l'equazione generale dell'azione meccanica del calore.

Un merito speciale di RANKINE è quello di avere, in una serie di memorie, applicato i principii della termodinamica a diverse questioni pratiche relative alle macchine a vapore e di essere l'autore del primo trattato di applicazioni pratiche della termodinamica (5).

Gli è anche a RANKINE che la fisica va debitrice dell'espressione *energia potenziale*, per designare l'attitudine a produrre lavoro (6).

Una diversa interpretazione dell'equivalente meccanico del calore venne nel 1853, data in Francia dal signor REECH. Invece di ammettere *a priori* che il lavoro prodotto da un trasporto di calore è proporzionale alla quantità di calore sparita, REECH stabilisce che in generale si può supporre che esso è eguale alla differenza delle quantità di calore preso e trasmesso, moltiplicate rispettivamente per la stessa funzione della temperatura della sorgente calda e della sorgente fredda, in altri termini che l'equivalente può considerarsi come una funzione della temperatura.

A REECH dobbiamo altresì delle memorie inserite nel 1851 nei *Comptes Rendus* e le sue lezioni fatte alla Sorbona sulla teoria meccanica del calore (7).

I risultati che CLAUSIUS ottenne come conseguenza dell'esistenza dell'equivalente meccanico furono ottenuti nel 1859 da BOURGET in un modo tutto diverso, dimostrando con un metodo assai semplice, ch'essi deb-

---

(1) THOMSON and JOULE — *On the thermal Effects of fluids in motion* nelle *Phil. Trans.* 1853.

(2) THOMSON — *On the mechanical Energies of the solar system* nelle *Trans. of the R. S. of Edinburgh* t. XXI, parte I — 1854, p. 63.

(3) RANKINE WILLIAM-JOHN-MACQUORN, nato in Edimburgh nel 1820 ingegnere civile a Glascow.

(4) RANKINE — *On the mechanical action of Heat* nelle *Trans. of the R. Soc. of Edinburg* t. XX — 1851 — pag. 147 — *Phil. mag.* — 1851.

(5) RANKINE — *A Manual of the Steam Engine* — London — 1859-1861.

(6) RANKINE — *Sopra la legge generale della trasformazione dell'energia*, memoria letta alla Società filosofica di Glascow il 5 gennaio 1853. — Il termine *Energia* è dovuto a TOMMASO YOUNG.

(7) Un sunto di queste lezioni, fatto da A. CAZIN, si trova inserito in appendice nell'*Esquisse historique* etc. l. c. del prof. TAIT trad. di Moigno a pag. 187.

Digitized by Google

bono aver luogo se realmente v'è questo equivalente la cui esistenza egli dimostra in pari tempo senza appoggiarsi a veruna ipotesi.

Il metodo di BOURGET, che per semplice via conduce alla formola

$$\mathbf{E} = \frac{\mathrm{P}\,\alpha}{\gamma\,(c_p - c_v)}$$

fu pubblicato nel tomo LVI della terza serie degli *Annales de chimie et de physique* ed è quello che noi riportiamo nella *Parte Terza*, capitolo III, applicandovi i valori relativi all'aria atmosferica.

Dal 1860 al 1866 un altro fisico e matematico, il signor ATANASIO DUPRÈ, pubblicò sia nei *Comptes Rendus* sia negli *Annales de ch. et de phys.* una lunga serie di memorie sulla termodinamica, esponendo le sue ricerche sperimentali ed analitiche su questo argomento. Tali memorie furono riunite in un volume intitolato *Théorie mécanique de la chaleur* e pubblicato a Parigi nel 1869.

Citeremo infine le celebri ricerche di REGNAULT, a tutti note, sui calori latenti e sui calori specifici dei fluidi elastici il cui risultato si formula nella legge che la dilatazione d'un gaz non assorbe calore che in quanto essa è accompagnata dalla produzione d'un lavoro meccanico, ricerche le quali permisero, col fornire dati preziosi, di stabilire la termodinamica sovra basi sperimentali.

Capitolo X

Teoria e parte analitica

CODAZZA — TURAZZA — SAINT-ROBERT — ZEUNER

Primo in Italia a trattare analiticamente la teoria meccanica del calore e ad esporne i principi fu l'ing. Prof. GIOVANNI CODAZZA. Nel principio del 1864 il Cav. CODAZZA pubblicò una sua nota *Sopra alcuni punti della teoria della forza motrice del calore* (1) della quale, dopo brevi cenni storici, stabilisce, con mirabile chiarezza e brevità, i principi fondamentali e trae alcune le conseguenze più importanti dedotte da CLAUSIUS, da RANKINE ecc., dimostra il teorema di CARNOT, l'equazione che THOMSON diede pei gaz (2) ed il teorema di THOMSON relativo all'effetto utile d'una macchina perfetta.

Questa memoria dell'egregio Prof. CODAZZA, per quanto breve possa sembrare, ha il vantaggio di riassumere concisamente, e tuttavia in modo assai chiaro, i principi della termodinamica ed ha il merito di essere la prima pubblicazione relativa a questa teoria che sia comparsa in Italia.

Un'altra più importante memoria dobbiamo al Prof. CODAZZA sulla teoria delle macchine a vapore in relazione alla teoria dinamica del calore che fu presentata dall'autore nel 1869 all'Istituto Lombardo.

La scienza dell'energia, la quale ha un sì ristretto vincolo colla termo-

(1) *Giornale dell'Ingegnere architetto ed agronomo* diretto dal March. E. Pareto t. 1 febbraio 1864, p. 333. — Questa nota fu ristampata nel *Nuovo Cimento* t. XVI, 1862 p. 61.
(2) Vedi *Parte prima*, capitolo IX p. 27.

che molto contribuì alla diffusione ed all'insegnamento di questa scienza ormai divenuta indispensabile agli ingegneri ed ai fisici.

L'opera del conte di Saint-Robert è divisa in 8 capitoli; nei quattro primi i principii della teoria sono esposti in modo analitico ed eminentemente chiaro e preciso; i capitoli seguenti contengono le loro applicazioni all'espansione dei corpi accompagnata o no da lavoro meccanico esterno, all'efflusso dei fluidi, al moto dei proiettili nelle armi a fuoco ed infine alle macchine termiche.

La parte che riguarda il moto dei proiettili è dovuta completamente al Saint-Robert il quale nel capitolo settimo dei suoi *Principes de thermodynamique* dà una soluzione del quesito riguardante la determinazione del moto dei gaz prodotti dalla deflagrazione della polvere nelle bocche a fuoco, questione che già occupò Piobert, Lagrange e Poisson.

Finalmente fra quelli che cooperarono poderosamente allo stabilimento matematico delle formole e delle equazioni della teoria meccanica del calore e che ne trassero importanti conseguenze per la pratica delle macchine caloriche citeremo l'illustre Gustavo Zeuner, professore di meccanica nella scuola Politecnica federale di Zurigo, il quale nel 1860 pubblicò in Freiberg i suoi *Grundzüge der Mechanischen Wärmetheorie* (1).

Nel 1866 Zeuner ne pubblicò una seconda parte nella quale seppe abilmente combinare coi suoi i lavori di Rankine (2).

Capitolo XI

Espositori della termodinamica.

Helmholtz. — Briot. — Combes. — Verdet
Résal. — Achard. — Jacquier.

Fra i primi a riunire in un solo corpo di dottrina le novelle idee ed a trarne feconde conseguenze ed applicazioni ai fenomeni d'induzione, all'elettro-chimica, alle correnti termo-elettriche, si deve ricordare Helmholtz il quale, colla sua memoria *Sulla conservazione della forza* (3), pubblicata nel 1847, senza che l'autore avesse cognizione dei lavori di Mayer, di Colding e di Joule, cercò di determinare le relazioni che possono esistere fra le azioni della natura basandosi sull'assioma dell'impossibilità di creare qualche cosa dal nulla, ed in cui l'impossibilità del moto perpetuo eretta a principio serve a dimostrare che tutte le forze naturali debbono esser dirette secondo le rette che uniscono due a due i diversi punti materiali reagenti e non esser funzioni che della distanza.

Dobbiamo parimenti ad Helmholtz in questo argomento, un più recente lavoro *Sulla trasformazione delle forze naturali* (4).

---

(1) Quest'opera di Zeuner venne tradotta da Hirn nella sua *Exposition analytique et expérimentale* etc. Paris 1862 e 1865 seconda edizione. — Il dottor Alessandro La Comunità ne fece una pregevole traduzione italiana nel *Giornale dell'Ing. Arch. ed Agr.* — t. XII, 1864 sotto il titolo: *Principii della teoria meccanica del calore* del dott. G. Zeuner.

(2) Tutti questi lavori di Zeuner vennero recentemente tradotti in francese dai signori M. Arnthal ed A. Cazin sotto il titolo: Zeuner. — *Théorie mécanique de la chaleur* — Paris 1869 — seconda edizione.

(3) Helmholtz. — *Die Erhaltung der Kraft*. Berlino 1847 — tradotta in francese da L. Pérard nel 1869.

(4) Helmholtz. — *Transformation des forces naturelles*, traduzione di L. Pérard — Paris Masson 1870.

Come pregevole opera espositiva della termodinamica merita particolare menzione quella del Prof. Carlo Briot il quale, dopo essersi occupato fino dal 1847 di questa teoria con una rimarchevole memoria (1), radunò in un trattato le sue lezioni col titolo: *Théorie mécanique de la chaleur.* (2)

Analogo a questo del Briot, ma più considerato in rapporto alla scienza dell'ingegnere, è il trattato matematico della termodinamica (3) che Combes pubblicò nel 1867.

Ma specialmente, quale espositore della teoria meccanica del calore, merita venir rammentato Verdet, l'uomo che più di tutti si adoperò in Francia alla diffusione della nuova dottrina, giacchè fino dal 1852 egli non cessò di pubblicare negli *Annales de chimie et de physique* dei riassunti o riviste, mirabilmente fatti, dei lavori che sulla nuova teoria si andavano compiendo in Inghilterra e nella Germania.

Dobbiamo anche a Verdet due lezioni da lui fatte alla *Société Chimique* di Parigi nel 1862, le quali riassumono in modo elementare la teoria dinamica del calore. (4)

Ma il più gran titolo di gratitudine che dobbiamo a Verdet è per averci lasciato le lezioni di fisica che egli era incaricato di fare sì alla Scuola Normale sia alla Politecnica di Parigi. I suoi allievi hanno raccolto queste lezioni le quali stanno ora pubblicandosi in splendida edizione.

Per quanto riguarda la termodinamica i signori Prudhon e Violle ne hanno già pubblicato il primo volume (5), lavoro del più gran pregio per l'insegnamento di questa teoria che ormai forma un ramo speciale di corso. In questo primo volume sono anche comprese le due *Lezioni* di cui abbiamo parlato.

Lavori di minor mole, ma tuttavia di non poco merito ed utilità furono fatti da altri autori e pubblicati allo scopo di presentare una sommaria esposizione della termodinamica.

Citeremo dapprima quello che il signor Résal, ingegnere delle miniere cui già dobbiamo una memoria sugli effetti meccanici prodotti sui corpi dal calore (6), pubblicò nel 1861 (7), è un esame o commentario dei lavori fatti sulla termodinamica, della quale, dopo alcune note storiche, il signor Résal determina le equazioni fondamentali.

Al signor Arturo Achard siamo debitori di una esposizione del secondo principio di termodinamica nella quale sono riportati i lavori di Clausius e di Rankine (8), infine al signor Emile Jacquier dobbiamo un piccolo libro (9) nel quale in modo veramente elementare stabilisce il primo principio della termodinamica sopra le più semplici esperienze e spiega in seguito per mezzo di tale principio, le leggi dirette della calorimetria.

---

(1) Briot. — *Essai sur la théorie mécanique de la chaleur* — Comptes Rendus t. XXIV pag. 877 — 1819.
(2) Briot. — *Théorie mécanique de la chaleur.* Paris. Gauthiers Villars. 1869.
(3) Combes. — *Théorie mécanique de la chaleur.* Paris. [illegible] 1867.
(4) Verdet. — *Exposé de la théorie mécanique de la chaleur — Deux leçons présentées à la Société chimique de Paris le [illegible] et le 21 février 1862* — pubblicate a Parigi sotto il titolo *Leçons de chimie et de physique professées en 1862.*
(5) Verdet. — *Théorie mécanique de la chaleur,* publiée par MM. Prudhon et Violle. — Paris 1870.
(6) *Comptes Rendus* — t. LI. 1860 p. 419.
(7) Résal. — *Commentaire aux travaux publiés sur la chaleur considérée au point de vue mécanique* — Annales des mines — quinta serie. t. XX — 1861.
(8) *Revue Suisse* — A. [illegible] et [illegible], marzo 1866.
(9) Jacquier. — *Exposition élémentaire de la théorie mécanique de la chaleur appliquée aux machines.* — Paris. Gauthiers-Villars. 1867.

Digitized by Google

I tre ultimi capitoli del libro di Jacquier sono meno elementari e si riferiscono al calore prodotto o consumato in un motore a gaz, al principio d'eguaglianza di rendimento nei diversi motori ed al calcolo dei vari rendimenti d'una macchina a vapore.

Capitolo XII

Napoli — Ferrini — Tyndall — Cazin — Secchi
Serpieri — Marco — Bertin — Tait.

Mentre la parte analitica della nuova teoria andava svolgendosi in Italia mercè i lavori di Codazza e di Turazza, non mancò chi fra noi ne esponesse i principî. Un egregio professore, il signor Federico Napoli intraprese fino dal 1858 in Genova una *Esposizione dei principî sperimentali e matematici della teoria dinamica del calore*. Questo lavoro di molto pregio, pubblicato nel 1860 (1), incomincia con alcuni cenni storici e colla descrizione delle esperienze principali di Joule, di Favre, di Leroux e di Matteucci e prosegue colla dimostrazione del primo teorema e poi di quello di Carnot generalizzato da Clausius. La Seconda Parte del lavoro del prof. Napoli tratta delle applicazioni alle leggi fisiche e particolarmente ai calori specifici, e termina colla teoria del gaz data da Kröning e da Clausius.

Una esposizione assai più elementare della termodinamica fu dell'egregio prof. Rinaldo Ferrini (2), presentata il 24 aprile 1864 alla Società Italiana di Scienze Naturali. L'opera del prof. Ferrini di notevole lunghezza e redatta con molta profondità di dottrina, è divisa in quattro parti. Nella prima, a guisa d'introduzione, sono enumerati i fenomeni nei quali allo sparire d'un lavoro meccanico si verifica la comparsa di una quantità di calore e viceversa, nella seconda sono esposti i principî della teoria e l'importanza ch'essi hanno nelle diverse parti della fisica, nella terza sono descritte le esperienze che condussero alla determinazione dell'equivalente meccanico del calore e sono indicati i punti in cui errava il Laboulaye nella determinazione dell'equivalente che egli dava nel 1878; la quarta ed ultima parte comprende l'applicazione della teoria alle macchine termodinamiche, è da notarsi in questa parte una dimostrazione assai elementare del secondo principio.

Questo lavoro del Ferrini è una preziosa opera che meriterebbe assai esser meglio conosciuta e sparsa fra gli studiosi delle scienze fisiche.

Meritano ancora speciale menzione quegli autori i quali colle loro opere hanno popolarizzato la teoria dinamica del calore, e fra questi citeremo Tyndall, Cazin, Secchi, Serpieri e Marco.

Il primo, col suo *Heat considered as a mode of Motion* e con una sua conferenza *Sulla Forza*, lavori che furono entrambi tradotti in francese dall'abate Moigno, contribuì grandemente alla volgarizzazione della nuova teoria esponendola in quel modo facile ed elegante che gli è proprio nelle sue lezioni alla *Royal Institution* di Londra. Il secondo il signor Cazin, già autore di delicate esperienze e di pregevoli memorie, con opere popolari come sono le *Forces physiques* e *la Chaleur*.

(1) *Giornale dell'Ing. Arch. ed Agr.* t. VIII — luglio 1860.
(2) *Atti della Soc. It. di Sc. Nat.* t. IV — agosto 1864.

Fra noi l'illustre Padro ANGELO SECCHI nell'ancea sua opera sulla *Unità delle forze fisiche*, mirabile sintesi delle forze naturali, espose con penna maestra le bellezze della nuova dottrina estendendone le applicazioni alla fisica tisica. Un consimile lavoro ha fatto un altro nostro distinto astronomo, il Padre ALESSANDRO SERPIERI, con la pregevole sua operetta *La forza considerata nelle principali sue trasformazioni*, pubblicata in Urbino (1870), come bella estensione dei principi della termodinamica, citeremo due lavori del prof. FELICE MARCO, la *Teoria meccanica del Sole* (1) e la *Teoria meccanica dell'elettricità e del magnetismo* (2).

Prima di terminare questa sommaria rassegna delle opere pubblicate sulla termodinamica citeremo ancora, nella parte storica, il *Rapport sur les progrès de la thermodynamique en France* compilato dal BERTIN nel 1867 ed un *Abbozzo storico della teoria dinamica del calore* dovuto al prof. PETER GUTHRIE TAIT di Edimburgo.

La prima di queste due opere, speciale per la Francia, non è esente da alcuni errori di nomi e di luoghi, errori non lievi dal punto di vista storico (3); la seconda per quanto sia incompleta e troppo parziale come storia (4), è tuttavia un lavoro assai pregevole come breve riassunto sintetico ed analitico delle leggi fondamentali della dinamica del calore e come profondo esame dei lavori di JOULE, di THOMSON, di CLAUSIUS, di RANKINE ecc.

Una completa storia della termodinamica, come in generale la storia d'una scienza in cui l'idea capitale venuta quasi nello stesso tempo alla mente di molti, ingigantisce in breve mercè numerosi lavori che si succedono gli uni agli altri in quel periodo di rapidi progressi che segue sempre d'appresso la scoperta d'un grande principio, è cosa difficilissima per non dire impossibile a farsi, specialmente quando siffatti lavori sono sparsi in tante pubblicazioni speciali ed in diversi paesi. I capitoli che precedono altro non sono che una successiva enumerazione di nomi o di opere, che una traccia, dirò così, per chi voglia, con maggior dovizia di cognizioni e profondità di dottrina, facendo un minuto esame d'ogni opera, tessere una *Storia della termodinamica* nella quale ogni benchè minimo progresso sia ben rilevato ed il merito d'ogni autore imparzialmente discusso. Pei primi lavori, fatti isolati ed origine della teoria, ho potuto estendermi un po' diffusamente; la stessa cosa non era più possibile, nè forse più egualmente necessaria, quando la termodinamica possedette già fondate basi e trattati completi, gli è perciò che gli ultimi capitoli son grandemente concisi a confronto dei primi.

(1) *Atti della R. Accademia delle Scienze di Torino* — anno 1882-1883.
(2) Torino, 1 aprile 1887.
(3) Il BERTIN chiama sempre col WILLIAM THOMSON col nome di THOMSON: lo confusione fra questi due fisici: lo chiama ingegnere di Edinburgh, mentre è professore a Glasgow; ricordando i lavori di CARNOT, BERTIN dimentica completamente l'idea capitale della reversibilità ecc.
(4) Il prof. TAIT accenna appena alle esperienze di HIRN, dimentica completamente i lavori di MOSSOTTI, di CODAZZA, di TUBAZZA, di DUPRÉ, di SAINTE-CLAIRE DEVILLE, di FAVRE ecc.; toglie gran merito alla scoperta di MAYER, non fa parola dell'opere di SAINT ROBERT ecc.

Digitized by Google

PARTE SECONDA

DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELL'EQUIVALENTE MECCANICO DEL CALORE

Capitolo I

Effetti termici delle correnti magneto-elettriche

JOULE.

Nel 1843 JOULE incominciò la numerosa serie delle rimarchevoli sue esperienze onde valutare l'equivalente meccanico del calore, a principio le sue ricerche per mezzo delle azioni magneto-elettriche (1).

Una grossa elettro-calamita fissa rimpetto ai poli d'una piccola elettro-calamita mobile produceva per induzione una corrente magneto-elettrica. La piccola elettro-magnete poteva ruotare ricevendo il movimento da un peso il quale, mediante un filo, si accavalcava sopra una puleggia.

Finchè il circuito dell'elettro-calamita fissa era aperto, la rotazione aveva luogo facilmente, ma essa diventava difficile non appena veniva chiuso il circuito.

Con varii saggi preliminari, JOULE pervenne ad ottenere, sotto l'influenza dell'elettro-calamita fissa, un moto uniforme di circa seicento giri al minuto.

Il lavoro meccanico necessario a mantenere questa rotazione di seicento giri era misurato dalla velocità colla quale discendeva il peso.

Si sa in fisica che le azioni che la calamita esercita sulla corrente indotta nel conduttore mobile, tendono ad opporsi al movimento d'onde risulta l'induzione; era adunque necessaria una certa quantità di lavoro meccanico per mantenere il movimento.

Il lavoro totale fornito dal peso diminuito del lavoro perduto in causa delle resistenze passive, è evidentemente la misura di questo lavoro meccanico e rappresenta l'equivalente del calore che si svolge nel filo della elettro calamita.

La quantità di calore svolta nella elettro-calamita mobile era misurata dalla variazione di temperatura dell'acqua in cui essa veniva immersa al principio ed al fine della esperienza e valutata mediante un termometro che dava i cinquantesimi di grado della scala Fahrenheit, e tenendo conto dell'effetto delle perdite di calore dovute alle azioni esterne.

La media delle otto esperienze che JOULE fece con questo procedimento fu:

$$E = 459,87 \text{ Chgm.}$$

Non è a meravigliarsi che questo valore sia di $\frac{1}{16}$ superiore al valore più probabile, stante la difficoltà di stabilire istantaneamente una temperatura comune all'acqua, al cilindro di ferro dolce ed ai fili coperti di seta che costituivano il sistema mobile.

(1) *Philosophical Magazine*, 1.ª terza serie t. XXIII.

Se allo chiodo d'un filo più o meno lungo o sottile in cui la corrente indotta è pochissimo intensa ed in cui è poco il calore che si sviluppa, si sostituisce un disco metallico, si ottiene l'elegante esperienza di LEONE FOUCAULT (1).

Capitolo II

Compressione o dilatazione dell'aria.

JOULE

Allorquando si comprime un corpo, esso si riscalda pel lavoro dinamico che si converte in calore, ed allorquando lo si dilata, il corpo si raffredda pel calorico attuale di esso che si converte in lavoro meccanico per vincere la pressione esterna.

Fu partendo da questi fatti che JOULE intraprese la seconda serie delle sue esperienze, pubblicata nel 1845 (2) e che si riferisce allo sviluppo di calore che accompagna la compressione dell'aria ed al calore assorbito da un gaz che si dilata effettuando un lavoro esterno.

Determinazione dell'equivalente mediante la compressione dell'aria. — In un recipiente assai forte di rame, della capacità di circa 2212 centimetri cubici, per mezzo d'una piccola pompa, JOULE compresse l'aria la quale, presa dall'atmosfera per mezzo d'un tubo di aspirazione, passava in un lungo serpentino immerso nell'acqua, nel quale assumeva una temperatura costante dopo di essersi essiccata nel passaggio attraverso il cloruro di calcio.

Nella sua parte inferiore il recipiente portava un tubo a gomito munito di apposito robinetto che permetteva all'aria di sortire. Recipiente e pompa erano immersi in un calorimetro che conteneva 20 chilogrammi e mezzo di acqua. Un doppio inviluppo metallico nel quale c'era uno strato d'aria impediva la dispersione del calore.

Col dare rapidamente un certo numero di colpi di stantuffo (300) in 20 minuti si portava la pressione a *22* atmosfere e si notava la corrispondente variazione di temperatura nel calorimetro. Messo poi il recipiente nella vasca idropneumatica si misurava, alla pressione ordinaria, il volume del gaz condensato.

Riportato l'apparecchio nel calorimetro si faceva una nuova esperienza dopo di aver interrotto la comunicazione fra il corpo di tromba ed il tubo di aspirazione e dando tanti colpi di stantuffo quanti se ne erano dati prima, è chiaro che la variazione di temperatura osservata era da attribuirsi al solo attrito contro le pareti del corpo di tromba ed alle medesime cause esterne che avevano influito nella prima esperienza.

Ripetendo molte volte questi esperimenti, spingendo la pressione da 10 atmosfere e mezzo a 21 atmosfere e mezzo, JOULE trovò in media

a 21,5 atmosfere	E = 452,72
a 10,5 »	E = 437,20

(1) FOUCAULT — *De la chaleur produite par l'influence de l'aimant sur les corps en mouvement* — *Comptes Rendus de l'Ac. des Sciences* t. XLI pag. 450.

(2) *Philosophical Magazine*, 1845 [illegible]

Digitized by Google

Determinazione dell'equivalente mediante la dilatazione dell'aria. — JOULE riprodusse dapprima, in modo più concludente, una celebre esperienza di GAY-LUSSAC (1), dimostrando con essa che l'aria può dilatarsi senza raffreddarsi sensibilmente, purchè non produca alcun lavoro esterno.

Prese due serbatoi A e B di rame, assai resistenti e della identica capacità, uniti mediante un tubo munito di robinetto col quale si apriva o si chiudeva la comunicazione fra i due serbatoi.

Nel vaso A, JOULE, compresse l'aria fino a 22 atmosfere, nel vaso B fece il vuoto. Messi i due vasi in un recipiente pieno d'acqua egli aprì il robinetto di comunicazione. L'aria compressa in A si precipitò in B raddoppiandosi di volume e discendendo alla pressione di 11 atmosfere.

Nessun lavoro esterno erasi effettuato e la temperatura dell'acqua in cui erano immersi i due serbatoi non andò menomamente.

Se ora si modifica questa esperienza in modo da produrre un lavoro esterno si deve manifestare un assorbimento di calore e si deve poterne dedurre l'equivalente meccanico **E**.

Infatti JOULE soppresse il serbatoio B ed usando lo stesso recipiente che gli aveva servito, mediante la compressione dell'aria, a valutare l'equivalente nella sopra descritta esperienza, egli vi compresse l'aria a 22 atmosfere, poi, adattato all'orifizio un tubo flessibile che andasse a far capo sotto una campana piena d'acqua e capovolta sulla vasca idropneumatica, egli aprì il robinetto e lasciò che l'aria vi si andasse a raccogliere vincendo, nello scacciar l'acqua dalla campana, la pressione atmosferica, operando così un lavoro esterno.

Il termometro del calorimetro in cui il recipiente era immerso, accusò subito, coll'abbassarsi, l'assorbimento di calore corrispondente al lavoro esterno che l'aria aveva effettuato.

I risultati di tre serie di esperienze condussero, in media, ai seguenti valori:

Dilatazione dell'aria da 21 ad 1 atmosfera **E** = 450,87
» 10 ad 1 » **E** = 447,58
» 23 a 14 » **E** = 417,96

Risultati che confermano quelli ottenuti colla compressione.

Capitolo III.

Attrito dei liquidi e dei solidi

JOULE.

Le più classiche e più rimarchevoli esperienze di JOULE sono quelle da lui intraprese nel 1849 sopra il calore prodotto dall'agitazione dei liquidi o dall'attrito dei solidi (2).

In un recipiente di metallo l'acqua era messa in moto da un agitatore composto di otto coppie di palette in ottone solidarie con un asse mobile

(1) La citata esperienza di GAY LUSSAC è descritta nella *Mémoires de la Société d'Arcueil*, t. I, 1806, p. 180 e negli *Ann. de ch. et de phys.*, 2.a serie, t. IX, 1818, p. 318.
(2) *Trans. Phil.* t. c. 1850, p. 61 — *Ann. de ch. et de phys.*, 3.a serie, t. XXXV, p. 121.

verticale e girante fra quattro coppie di alette, parimenti in ottone, fisse nella parete interna del recipiente.

L'asse verticale era pur esso in ottone, ma interrotto in un certo punto da un pezzo di legno destinato ad impedire la dispersione, per conduttibilità, del calore.

Il recipiente in cui questo sistema era introdotto, conteneva da 6 a 7 chilogrammi di acqua, ed era chiuso con un coperchio munito di due aperture, una per dar passaggio all'albero di rotazione, l'altra per tenervi immerso un termometro.

La rotazione dell'agitatore si otteneva mediante un cordone avvolto sull'albero dell'agitatore il quale si accavalcava da una parte e dall'altra sopra due puleggie perfettamente eguali le quali erano messe in rotazione dalla discesa, lungo due aste verticali graduate, di due pesi perfettamente identici. I fili che sostenevano questi pesi si avvolgevano sopra due subbi del diametro di due pollici inglesi, il diametro delle puleggie era di un piede, ed i loro assi in acciaio riposavano, onde attenuare gli attriti, sopra un sistema di rotelle analogo a quello impiegato nella macchina di Atwood.

Uno scanno in legno portava il vaso col quale non aveva che pochi punti di contatto. Un grande diaframma poi veniva collocato fra l'operatore e l'apparecchio, onde evitare anche il calore raggiante dalla persona.

Al principio dell'esperienza, tenendo in riposo l'apparecchio per mezzo della manovella, i pesi erano alla estremità superiore della loro corsa. Un termometro sensibilissimo, graduato in centesimi di grado della scala Fahrenheit, veniva immerso nel vaso e dava la temperatura iniziale dell'acqua, poi, abbandonando la manovella, si lasciava che i pesi discendessero fino al suolo del laboratorio. Questa esperienza fu da Joule ripetuta una ventina di volte; poi si determinava nuovamente la temperatura dell'acqua nel vaso e quella dell'aria nel laboratorio al principio, alla metà ed alla fine dell'esperienza, la quale durava circa 35 minuti. I pesi pesavano 11478,27 grammi ciascuno, l'altezza di caduta era di m 1,60, la loro velocità media era di millim. 61,3 per secondo.

Lo stesso apparecchio ora descritto, colla sola differenza che il vaso era in ferro e ghisa invece che in ottone e in rame, servì pure per le esperienze in cui all'acqua contenuta nel recipiente Joule sostituì il mercurio. In queste seconde esperienze però l'agitatore non portava che 6 coppie di palette mobili fra otto coppie di alette fisse.

Prendendo la media di ogni serie di esperienze e denominando con

t — l'elevazione di temperatura dell'apparecchio calorimetrico valutata in $\frac{1}{200}$ di grado della scala Fahrenheit;

T — la variazione di temperatura corrispondente all'effetto dell'irradiazione,

P — la somma dei pesi motori espressa in grani,

p — il peso equivalente agli attriti esterni,

a — il peso rappresentante l'attrito dei pesi,

H — il cammino totale percorso dai pesi espresso in pollici inglesi,

h — l'altezza da cui essi avrebbero dovuto cadere liberamente per acquistare la forza viva distrutta dall'urto sul suolo,

Joule ottenne i seguenti valori

	t	T	P	p	a	H	h
Acqua	0,575	0,013	406152	2837	168	1260,248	0,008
Mercurio	2,414	0,066	499099	2837	168	1262,731	0,152
	0,916	0,051	137326	1040	168	1292,822	0,047

Digitized by Google

ed essendo, come sempre, **E** il numero di chilogrammetri corrispondente allo sviluppo d'una caloria, si ricava.

Coll'acqua $\quad$ **E** = 424,398 Chilogrammetri
Col mercurio { **E** = 424,625 » ; **E** = 426,019 » } media: **E** = 425,322

Fra tutte queste, veramente ammirabili esperienze di JOULE, la prima sul mercurio è quella che merita la maggior considerazione; la elevazione θ di temperatura vi ha il suo massimo valore, la correzione dovuta alla irradiazione è debolissima, il valore più esatto dell'equivalente meccanico del calore può dunque considerarsi essere quello di

E = 425 chilogrammetri

Mantenendo lo stesso l'apparecchio dei pesi motori o delle puleggie, misurando allo stesso modo la quantità di calore svolto e di lavoro speso, e modificando soltanto il recipiente e il calorimetro, JOULE esperimentò l'attrito della ghisa sulla ghisa (1)

L'apparecchio si componeva di un asse verticale in ferro solidario con una ruota in ghisa che girava con esso ed era tagliata a tronco di cono in modo da fregarsi, girando, contro un'altra ruota, pure in ghisa, la quale era mantenuta contro la prima da un apparecchio che si faceva discendere per mezzo d'un'asta che si muoveva col braccio d'una leva. Il tutto era collocato in un vaso di ghisa pieno di mercurio

In due serie di esperienze, conservando le denominazioni adottate, JOULE trovò

	θ	T	P	p	n	H	h
Prima Serie —	4,303	0,210	409000	2857	168	1260,027	5,000
Seconda Serie —	1,510	0,022	137326	1040	168	1279,917	0,094

le quali due serie condussero ai valori

E = 426,400 Chilogrammetri
E = 425,117 » } media: **E** = 425,758

Un valore prossimo a questi risultati fu determinato da FAVRE colle sue belle esperienze sull'attrito dell'acciaio contro l'acciaio (2)

Capitolo IV.

Attrito dei solidi

HIRN

La prima parte della memoria che HIRN inviò alla Società di Fisica di Berlino (3) contiene la descrizione ed i risultati delle esperienze che l'abile ingegnere di Colmar istituì allo scopo di saggiare le sostanze lubrificanti e nello stesso tempo di valutare l'equivalente meccanico del calore

(1) *Phil. Trans.* 1850.
(2) *Comptes Rendus* t. XLVI p. 337
(3) Vedi la *Parte prima* — Capitolo VI

Digitized by Google

L'apparecchio di cui Hirn si servì ha molta analogia col freno dinamometrico di Prony. Esso è composto di un tamburo cavo di ferraccio, cilindrico ed esternamente levigato; questo tamburo per mezzo d'un apposito congegno può ruotare sul proprio asse; un cuscinetto di bronzo posato sul tamburo ne abbraccia la metà superiore; in una cavità di questo cuscinetto si può collocare un termometro. Una leva si appoggia ai labbri del cuscinetto mediante due sostegni, avvitati su essa, due appendici unite ad angolo retto ai capi della leva, sostengono, per mezzo di uncini, l'uno il piatto della bilancia su cui si può collocare un peso, l'altra una grande massa di piombo sospesa ad un asta orizzontale che prolungata incontrerebbe l'asse del tamburo. Un indice unito ad angolo retto alla leva ne fa riconoscere l'orizzontalità.

La superficie di contatto fra il cuscinetto ed il tamburo viene lubrificata con olio o grasso o altra sostanza, poi si fa ruotare il tamburo.

Una corrente d'acqua di nota temperatura è spinta continuamente nella cavità dalla quale sorte per esser raccolta in un vaso dove facilmente se ne misura il volume e la temperatura.

La quantità di lavoro viene facilmente determinata, come si fa col freno di Prony, dal peso da aggiungersi alla massa per mantenere in equilibrio la leva finchè il tamburo gira con una data velocità.

Dalla temperatura dell'acqua si misura la quantità sviluppata di calore.

Nella prima esperienza, usando l'olio di oliva come materia lubrificante, il tamburo facendo 1394 giri in 31 minuti, cioè 45 giri al minuto, ed essendo il peso di carico di kg 6, 1, Hirn trovò,

$$E = 370 \text{ Chgm}$$

Ripetute un gran numero di volte le esperienze, Hirn ottenne 30 valori di E (1) i quali si accordano bene insieme giacchè i valori estremi sono 360 e 382; la media calcolata è

$$E = 371,6 \text{ Chgm}$$

Capitolo V.

Attrito dell'acqua

Hirn.

Nella stessa Memoria inviata a Berlino (2) si trova ancora una serie di esperienze eseguite da Hirn col far girare l'acqua fra due cilindri uno dei quali era fisso, mentre l'altro, l'interno, girava seco trascinando il liquido.

Con otto diverse determinazioni i cui risultati variarono dal valore E = 398 al valore E = 465, Hirn trovò in media

$$E = 422 \text{ Chgm}$$

Nella nuova edizione dei suoi lavori, pubblicata nel 1865 (3), Hirn cita

(1) Hirn — *Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur* — Colmar — 1858 — Paris — Mallet-Bachelier — Capitolo I. e tavola annessa.
(2) Hirn — *Recherches sur l'eq.* etc. 1858 l. c.
(3) Hirn — *Théorie mécanique de la chaleur* — Paris — Gauthier-Villars — 1865 — pag. 58.

Digitized by Google

ancora sei esperienze consecutive fatte sull'acqua le quali gli diedero in media.

$$E = 432 \text{ Chgm}$$

È ancora all'attrito che bisogna attribuire lo sviluppo di calore che ha luogo nell'efflusso dell'acqua da piccoli fori sotto forti pressioni.

HIRN (1) fece sortire, per un ristretto orifizio, l'acqua contenuta in un cilindro di 0,0003688 metri quadrati di sezione, facendola premere da un peso di 177 chilogr. Occorrevano però 10 chilogr. per vincere la resistenza del corpo di tromba, laonde, effettivamente, la forza premente l'acqua non era che di 167 chilogr. cioè di

$$\frac{167}{0{,}0003688} = 452819 \text{ Chilogr. per m. q.}$$

Sia questa la superficie dello stantuffo e facciamolo discendere di 1 metro, il lavoro speso sarà evidentemente

$$\overset{ch}{452819} \times \overset{m}{1} = 452819 \text{ Chgm}$$

ed esso farà uscire 1000 chilogr. d'acqua la quale, nell'esperienza di HIRN, fu trovata riscaldata di 1°,0447. Essa aveva dunque acquistato 1045,7 calorie.

Si avrà quindi:

$$E = \frac{452819}{1045{,}7} = 433{,}02 \text{ Chgm}$$

Capitolo VI

Schiacciamento del piombo

HIRN.

L'apparecchio adoperato da HIRN per valutare l'equivalente meccanico del calore mediante lo schiacciamento del piombo ha molta analogia con un pendolo balistico.

Un grosso cilindro in ghisa è sostenuto da due corde verticali, il suo peso è P. Un cilindro di ferro è pure sospeso e funziona da martello o ariete il suo peso è P'. Un terzo pezzo di piombo con una piccola cavità è sospeso fra questi due cilindri, il suo peso è p, il suo calore specifico è c.

Ognuno di questi tre pezzi è sospeso alla distanza l del suo centro di gravità dall'asse di sospensione e questo l si determina colla nota formola del pendolo:

$$t = \frac{60}{N} = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

in cui N è il numero delle oscillazioni complete in un minuto

(1) HIRN — *Théorie méc.* etc. 1865 I. e pag. 50

Se si solleva l'ariete d'un'altezza h e poi lo si lascia ricadere, esso schiaccierà il piombo contro l'incudine.

Così disposte le cose, Hirn misurò il lavoro perduto ed il calore acquisito. Il martello di peso P' fu sollevato di h, il lavoro della sua caduta è adunque $P' h$, ma per elasticità esso si risolleva di h', dunque ha perduto una quantità di lavoro eguale a

$$P' (h - h')$$

L'incudine, per l'urto, si è spostata, è salita d'una quantità h, essa dunque ha assorbito una quantità di lavoro

$$P h''$$

Il lavoro assorbito dal piombo fu adunque

$$L = P' (h - h') - P h''$$

Occupiamoci ora del calore creato.

Sia a la temperatura dell'ambiente in cui si fa l'esperienza, sia t la temperatura del piombo prima dell'urto nota con un termometro sensibilissimo collocato nella cavità del piombo e che si ritira nel momento in cui l'ariete sta per cadere.

Dopo l'urto si leva il piombo dalle cordicelle che lo sostengono e nella cavità si versa un peso p' di acqua fredda e si osserva, di 4 minuti in 4 minuti, le indicazioni del termometro. Esperienze preliminari avevano dimostrato che l'acqua fredda prende rapidamente la temperatura del piombo.

Sia t_0 la temperatura iniziale che sarebbe comune al piombo ed all'acqua se l'equilibrio calorifico si stabilisse istantaneamente fra queste due sostanze.

Siano t_1 e t_2 le loro temperature osservate 4 minuti ed 8 minuti dopo l'urto, gli eccessi sulla temperatura ambiente saranno

$$t_0 - a \qquad t_1 - a \qquad t_2 - a$$

Ora quando, in fisica, si sottomette al raffreddamento una delle palle del termometro differenziale per dimostrare la legge di Newton, l'esperienza prova che gli eccessi di temperatura indicati da questo istrumento formano una progressione geometrica se il tempo cresce in progressione aritmetica (1) (da ciò appunto, col calcolo differenziale, si ricava la legge di Newton), per determinare t_0 avremo dunque la proporzione

$$\frac{t_0 - a}{t_1 - a} = \frac{t_1 - a}{t_2 - a}$$

L'espressione del calore creato sarà

$$Q = p\ c\ (t_0 - t) + p'\ t_0$$

Quindi

$$E = \frac{P' (h - h') - P\ h''}{p\ c\ (t_0 - t) + p'\ t_0}$$

(1) Jamin — *Cours de physique* — Paris — 1858 — t. II p. 256 — Daguin — *Traité élémentaire de physique* — Toulouse — 1861 — t. II, p. 117.

Digitized by Google

Sostituendo i valori trovati in sei esperienze, Hirn trovò in media:

E = 425 Clgm

Capitolo VII

Calore di una corrente che produce un lavoro meccanico

FAVRE.

Nella sua bella memoria sull'origine del calore voltaico (1) FAVRE aveva chiaramente stabilito che questo calore è dovuto interamente all'azione chimica della pila.

Quando all'infuori di qualunque circuito voltaico, FAVRE discioglieva nell'acido solforico un equivalente di zinco, cioè 33 chilogrammi, si producevano sempre 18796 calorie: le quali 18796 calorie si ritrovavano sempre nel circuito appena che un equivalente di zinco fosse stato disciolto nella pila; esse vi erano però inegualmente ripartite, ciascuno dei conduttori parziali del circuito chiuso avendone ricevuto una quantità proporzionale alla sua resistenza.

Il calore sviluppato nel circuito totale era dunque l'equivalente esatto del lavoro delle affinità, ma il calore dovuto a questo lavoro era stato impiegato a riscaldare il circuito, nessuna parte di esso si era potuta trasformare in lavoro esterno. Ma se la corrente avesse prodotto un effetto meccanico, questo lavoro esterno avrebbe dovuto assorbire una parte del calore dovuto all'azione chimica e questa porzione di calore sparita avrebbe dovuto essere proporzionale al lavoro prodotto. Con questa via si doveva poter determinare l'equivalente meccanico del calore.

È appunto questa ricerca che forma il soggetto della memoria presentata nel 1857 da FAVRE all'Accademia delle Scienze di Parigi (2).

L'apparecchio di cui si servì FAVRE si componeva d'una pila e di un elettro-motore posti in due calorimetri. La pila era costituita di cinque coppie di zinco amalgamato e di platino platinato. La pila e l'elettro-motore comunicavano per via di fili conduttori di rame coperti di guttaperca. Mediante un apposito congegno il moto comunicato dalla corrente all'elettro-motore si trasmetteva fuori del calorimetro ed era impiegato al sollevamento d'un peso con cui si misurava il lavoro meccanico prodotto dall'elettro-motore.

Quando il lavoro motore prodotto dall'azione chimica non era impiegato a sollevare il peso, il calore in tutto il circuito, compresa la pila, era sempre di 18796 calorie per ogni equivalente di zinco disciolto. Ma quando il meccanismo funzionava al sollevamento del peso questo ammontare di calorie era sempre minore e la differenza era proporzionale al lavoro prodotto. Ad ogni caloria sparita corrispondeva un lavoro esterno in media di cinque esperienze, di 443 chilogrammetri.

Laonde:

E = 443 Clgm.

(1) Ann. de ch. et de phys. 1854 t. XL pag. 293.
(2) Comptes Rendus — 1857 t. XLV pag. 56.

Capitolo VIII

Attrito dell'acciaio

FAVRE

I risultati ottenuti da JOULE coll'attrito della ghisa contro la ghisa ebbero una bella conferma nelle esperienze di FAVRE sull'attrito dell'acciaio contro l'acciaio, presentate all'Accademia delle Scienze di Parigi il 15 febbraio 1858. (1)

L'apparecchio, di singolare precisione, era rinchiuso nell'ingegnoso calorimetro a mercurio inventato dallo stesso FAVRE e da SILBERMANN, col quale si misurava il calore prodotto.

All'esterno del calorimetro la caduta di un peso che metteva in moto l'apparecchio, misurava il lavoro motore che veniva distrutto, dentro il calorimetro dall'attrito di due pezzi di acciaio foggiati a freno.

La quantità di calore svolta non era mai inferiore a 300 calorie in ogni esperienza.

Con molte esperienze assai concordanti fra loro, ma delle quali, nella sua memoria, FAVRE non dà il risultato in dettaglio, si potè valutare, in media

$$E = 413{,}2 \text{ Chilogrammetri}$$

Capitolo IX

Consumo di calore nelle macchine magneto-elettriche

LEROUX

Se nell'esperienza già citata di FOUCAULT si misura contemporaneamente il lavoro necessario a vincere la resistenza dovuta alla reazione magneto-elettrica ed il calore prodotto, si potrà dedurne l'equivalente meccanico del calore.

Questo fu appunto lo scopo delle ricerche che il signor LEROUX intraprese colle potenti macchine magneto-elettriche della compagnia l'*Alliance* (2) sì preziose per la produzione della luce elettrica e che consistono essenzialmente in bobine d'induzione giranti dinanzi a calamite. Questo moto dà origine a delle correnti indotte, e queste correnti stesse agendo sulle calamite che le hanno prodotte, tendono a chiudere il circuito; per mantenere il moto della macchina occorre adunque spendere

(1) *Comptes Rendus* t. XLVI pag. 337.

(2) Queste esperienze sono descritte nei *Comptes Rendus* t. XLV p. 414 e negli *Ann. de ch. et de phys.* 3.a serie t. I p. 473. — Le conclusioni di queste esperienze si trovano anche nel *Giornale dell'ingegnere architetto ed agronomo* diretto dal marchese ingegnere RAFFAELE LASTE t. V luglio 1852 p. 48. — Il prof. FEDERICO NAVILLE ne diede anche una dettagliata relazione nel *Nuovo Cimento* e nel già citato *Giornale dell'ingegnere* ecc. t. VIII luglio 1853 p. 335.

Digitized by Google

più lavoro quando il circuito è chiuso che quando è aperto. La differenza di lavoro meccanico nei due casi, rappresenta il lavoro impiegato a produrre la corrente il cui passaggio attraverso le bobine ed il conduttore unipolare genera una quantità di calore equivalente al lavoro meccanico impiegato nella produzione della corrente elettrica.

In una delle esperienze la macchina era mossa da una ruota a manubrio munita della manovella dinamometrica di Morin. La velocità di questa essendo di 40 giri per minuto, il lavoro impiegato a circuito aperto era di 5,72 Chgm. per ogni giro di manovella corrispondente a quattro giri della macchina. A circuito chiuso 444 giri di manovella produssero nel calorimetro un'elevazione di temperatura di 17°, 17 richiedendo in più un lavoro di 4, 9, Chgm. ad ogni giro, cioè, in totale un lavoro di 5312 Chgm. Nel calorimetro si contenevano gr. 198,8 di acqua e tenendo conto di tutte le necessarie correzioni il calore sprigionato nel calorimetro si trovò di 3,342405 calorie. Le resistenze, nel circuito totale, erano di 189,8 divisioni del reostato e di 55,2 nella spirale di platino.

La quantità di calore era adunque di

$$3,^{cal}342405 \times \frac{189,8}{55,2} = 11,^{cal}492$$

Dividendo il lavoro per questa quantità di calore si ottiene

$$E = 462,3 \text{ Chilogrammetri}$$

In altre due esperienze eseguite in vario modo, Le Roux ottenne

$$E = 469,37 \quad \text{Chgm.}$$

$$E = 442 \quad \text{«}$$

quindi, in media,

$$E = 457,89 \quad \text{Chgm.}$$

Valore che poco differisce da quello trovato da Joule (1) con analoghe esperienze, valore però troppo grande e ciò in causa della difficoltà di tener conto del calore che si svolge nei punti in cui si interrompe il circuito nonchè delle induzioni che si esercitano sui corpi circostanti.

Capitolo X.

Calore svolto dalle correnti indotte

MATTEUCCI

Servendosi di un motore elettro-magnetico e misurando il lavoro equivalente al calore che si svolge dalle correnti indotte, il compianto MATTEUCCI ha cercato il valore dell'equivalente meccanico del calore.

L'apparecchio constava del motore in cui le elettro-calamite erano

(1) Vedi *Parte seconda* — Capitolo I — pag. 35.

formato di due bobine sovrapposte e costrutte con fili di rame bene isolati fra di loro, d'una pila e del commutatore a denti di platino, il cui asse veniva posto in moto da un peso. Quando l'asse del commutatore gira con velocità uniforme si hanno nel circuito un certo numero di interruzioni e di passaggi nella corrente i quali possono esser variati di numero col variare il peso motore.

La corrente passa in una delle spirali, o quando la velocità di rotazione è divenuta uniforme, si riuniscono gli estremi della seconda spirale, la macchina allora scema di molto la sua velocità ed anche si ferma, scomparendo quasi le scintille che avevano luogo ad ogni interruzione del commutatore; aprendo il circuito della spirale indotta, la macchina riprende la sua velocità e le scintille ricompaiono. Adattando all'asse della macchina un cilindro si può ottenere l'elevazione di un peso con una data velocità essendo aperta la spirale indotta, o quando questa sia chiusa converrà, per ottenere la stessa velocità, sostituire un peso assai minore del precedente.

Si potrà quindi paragonare il lavoro meccanico eseguito dalla macchina a circuito indotto aperto ed il lavoro a spirale indotta chiusa; la differenza darà la quantità di lavoro impiegato nella corrente indotta; ora questa, nel vincere le resistenze del circuito sviluppa del calore, si otterrà dunque facilmente, dal paragone della quantità di lavoro colla quantità di calore, l'equivalente meccanico.

Variando le sue esperienze con calorimetri diversi e con liquidi differenti, MATTEUCCI ottenne:

$$E = 438{,}96 \text{ Chgm}$$

Capitolo XI

Variazioni di temperatura nei fili metallici

EDLUND

Le esperienze di EDLUND (1) furono dirette sopra un fenomeno calorifico ancora poco studiato, lo sviluppo cioè, o l'assorbimento di calore che accompagna la contrazione ovvero lo allungamento di un filo metallico.

Nel suo lavoro EDLUND misura successivamente:

1.° La quantità di calore assorbita da un filo che si allunga nello stesso tempo che un peso attaccato alla sua estremità discende d'una data quantità.

2.° La quantità di calore sviluppata da questo stesso filo quando esso si raccorcia d'una quantità eguale all'allungamento precedente sollevando lo stesso peso.

3.° La quantità di calore sviluppata quando il filo si raccorcia senza sollevare alcun peso.

---

(1) EDLUND — *Ricerche sui fenomeni calorifici che accompagnano i cambiamenti di volume dei corpi solidi e sul lavoro meccanico corrispondente* nei *Poggendorff's Annalen* t. LXIV pag. 1. — Vedi una dettagliata analisi di queste esperienze nel VERDET — *Théorie méc. de la chal.* publiée par MM. PRUDHON e VIOLLE — Paris — 1868, t. I, p. 68 — Vedi anche *Ann. de chim. et de phys.* — 3.e série, t. LXIV p. 215.

Digitized by Google

Le due prime quantità debbono esser fra loro eguali, la terza deve esser maggiore.

Per valutare queste quantità di calore, Edlund si servì d'una pinzetta termo-elettrica di particolare ed ingegnosa costruzione.

La prima serie di esperienze ebbe luogo sopra un filo d'acciaio (corda di pianoforte) di mill. 1,14 di diametro e di circa m. 0,30 di lunghezza; le altre sopra fili di argento, di ottone, di platino, etc.

In un suo lavoro più recente (1) Edlund trovò per l'equivalente meccanico del calore i seguenti valori:

Con un filo d'argento ...... **E** = 433,6 Chgm.
» di rame ...... **E** = 430,1 »
» di ottone ...... **E** = 428,3 »

laonde, in media:

E = 430 66 Chgm. (2)

(1) Edlund — *Determinazione quantitativa dei fenomeni caloriaci che si producono durante il cambiamento di volume dei metalli ecc.* nei *Poggendorff's Annalen* — 1865, N. 12 tradotte là Fritz negli *Ann. de ch. et de phys.* — 4.a serie, t. VIII, pag. 257, luglio 1866.

(2) Edlund assume invece per media il valore 431. Ci pare più esatta la media di 430,660.

PARTE TERZA

DETERMINAZIONE ANALITICA DELL'EQUIVALENTE MECCANICO DEL CALORE

Capitolo I.

Equazioni fondamentali di termodinamica

Supponiamo che all'unità di peso di un corpo si somministri una quantità infinitamente piccola di calore dQ, valutata in calorie, nello stato del corpo avranno luogo questi cambiamenti:

1.° Accrescimento di moto molecolare; sia dT, l'accrescimento della forza viva, in unità di lavoro.

2.° Cangiamento di posizione degli atomi e delle molecole, a questo cangiamento corrisponde un lavoro che rappresenteremo con dI, espresso anche in unità di lavoro.

3.° Cangiamento, in generale, del volume del corpo il quale, dilatandosi deve vincere la pressione esterna, esso perciò deve fare un lavoro che diremo dL.

Pel principio fondamentale di termodinamica avremo:

$$\text{(I)} \qquad dQ = \frac{1}{E}\left(dT + dI + dL\right)$$

Poniamo:

$$dT + dI = dU$$

l'equazione diverrà:

$$\text{(II)} \qquad dQ = \frac{1}{E}\left(dU + dL\right)$$

nella quale dU rappresenta il lavoro totale prodotto durante l'introduzione del calore dell'interno del corpo.

In ciò che segue chiameremo U il lavoro interno, per cui dU sarà l'accrescimento del lavoro interno (1).

Se il lavoro interno dell'unità di peso fosse quantità determinabile, essa sarebbe funzione del volume specifico v e della pressione specifica p, si potrebbe dunque porre:

$$U = \varphi\,(p, v)$$

---

(1) La quantità U è detta da Kirchhoff *die Wirkungsfunktion*. Thomson la chiama *the mechanical energy of a body in a given state*. Saint-Robert la dice *chaleur disponible*. Zeuner la definisce *il lavoro meccanico immagazzinato nel corpo*.

Digitized by Google

e differenziando

$$dU = \left(\frac{dU}{dp}\right) dp + \left(\frac{dU}{dv}\right) dv$$

e ponendo

$$\left(\frac{dU}{dp}\right) = X \qquad e \qquad \left(\frac{dU}{dv}\right) = Z$$

si avrà

(III) $$dU = Xdp + Zdv$$

la quale equazione dà l'accrescimento del lavoro interno.

Ciò premesso, quando la pressione esterna che sopporta un corpo è eguale alla sua forza espansiva, pel lavoro esterno eseguito quando il volume v dell'unità di peso cambia, per causa dell'acquisto di calore dQ, della quantità dv, si ha

(IV) $$dL = pdv$$

Ora nell'equazione (II) sostituendo a dU e dL i loro valori avuti dalle (III) e (IV), si avrà:

$$dQ = \frac{1}{E}\left(Xdp + Zdv + pdv \right) = \frac{1}{E}\left[Xdp + \left(Z + p\right) dv \right]$$

e ponendo

(V) $$Z + p = Y$$

si avrà

(VI) $$dQ = \frac{1}{E}\left(Xdp + Ydv\right)$$

Differenziando la (V) rispetto a p e trasportando si ha

(VII) $$\left(\frac{dY}{dp}\right) - \left(\frac{dZ}{dp}\right) = 1$$

Ma l'equazione (III) è una differenziale esatta, quindi si deve avere

$$\left(\frac{dX}{dv}\right) = \left(\frac{dZ}{dp}\right)$$

ed allora l'equazione (VI) diventa

(a) $$\left(\frac{dY}{dp}\right) - \left(\frac{dX}{dv}\right) = 1$$

Questa è la *prima equazione fondamentale di termodinamica* (1)

La *seconda equazione fondamentale di termodinamica*, presentata per la prima volta da CLAPEYRON, poi da CLAUSIUS, è data da ZEUNER (2) sotto la forma:

$$(\beta) \qquad S = Y \left(\frac{dS}{dp}\right) - X \left(\frac{dS}{dv}\right)$$

in cui S è una funzione il cui valore e la cui forma si possono determinare quando si conoscano le quantità X ed Y in funzione di p e di v.

Chiamando t la temperatura contata a partir dallo zero centigrado, a una costante, e supponendo che S rappresenti anche la misura della temperatura, potremo porre:

$$S = a + t = F(p, v)$$

differenziando

$$\text{(VIII)} \qquad \begin{cases} \left(\frac{dS}{dp}\right) = \left(\frac{dt}{dp}\right) \\ \left(\frac{dS}{dv}\right) = \left(\frac{dt}{dv}\right) \end{cases}$$

sostituendo questi valori nella equazione (β), si ha:

$$\text{(IX)} \qquad a + t = Y \left(\frac{dt}{dp}\right) - X \left(\frac{dt}{dv}\right)$$

D'altronde, essendo S funzione di p e di v, si potrà porre:

$$\text{(X)} \qquad dS = \left(\frac{dS}{dp}\right) dp + \left(\frac{dS}{dv}\right) dv$$

Ora dalla (β) ricavo i valori di Y e di X e li sostituisco nella (VI), poi semplificando i risultati per mezzo dell'equazione (IX) ed all'equivalente termico $\frac{1}{E}$ sostituendo la lettera A, avremo:

$$\text{(XI)} \qquad \begin{cases} dQ = \dfrac{A}{\left(\frac{dS}{dp}\right)} (XdS + Sdv) \\ dQ = \dfrac{A}{\left(\frac{dS}{dv}\right)} (YdS - Sdp) \end{cases}$$

(1) Quest'equazione fu stabilita per la prima volta da CLAUSIUS benchè sotto altra forma.
(2) ZEUNER — *Théorie mécanique de la chaleur*, trad. par MM. ARNTHAL e CAZIN, p. 40.

Google

Abbiamo adunque tre equazioni la (VI) e le due (XI), le quali sono identiche ma che sotto le varie loro forme si addittano meglio alla risoluzione del problema. Sostituendo A ad $\frac{1}{E}$ nella prima, ponendo, nelle due ultime, per S il suo valore $a + t$, e tenendo conto delle equazioni (VIII), si hanno quest'altre forme di equazioni:

$$\text{(XII)} \quad \begin{cases} dQ = A\,(Xdp + Ydv) \\ dQ = \dfrac{A}{\left(\dfrac{dt}{dp}\right)} \left[Xdt + (a + t)\ dv \right] \\ dQ = \dfrac{A}{\left(\dfrac{dt}{dv}\right)} \left[Ydt - (a + t)\ dp \right] \end{cases}$$

Gli è sotto queste forme che noi adopreremo queste equazioni fondamentali per la ricerca analitica dell'equivalente meccanico del calore, applicandole ai corpi pei quali si conosce una relazione fra la temperatura, la pressione ed il volume.

Capitolo II.

Determinazione dell'equivalente meccanico del calore coll'applicazione delle equazioni fondamentali ai gaz permanenti

Tutti i gaz e vapori soprariscaldati tendono verso uno stato-limite che è caratterizzato dalle leggi di Mariotte e Gay-Lussac. Queste leggi sono:

Legge di Gay-Lussac. *Tutti i gaz permanenti hanno lo stesso coefficiente di dilatazione α e questo coefficiente è indipendente dalla pressione e dalla temperatura.*

Legge di Mariotte. *I volumi di una stessa massa di gaz alla stessa temperatura sono in ragione inversa delle pressioni.*

Dalla combinazione di queste leggi si ottiene l'equazione

$$\text{(1)} \qquad \frac{v}{v_0} = \frac{p_0}{p} \cdot \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t_0}$$

nella quale

v e v_0 sono i volumi dell'unità di peso di un gaz;

p e p_0 sono le sue pressioni alle temperature

t e t_0 valutate gradi centigradi;

α è il coefficiente di dilatazione del gaz.

In questi ultimi tempi con le stupende sue ricerche, Regnault dimostrò che questa di Mariotte e Gay-Lussac non è rigorosamente esatta. Le differenze da lui trovate nelle esperienze sono debolissime

pel gaz permanenti, esse non divergono più considerevoli che pei gaz che si possono condensare. (1)

In media pei gaz permanenti si può prendere:

$$\alpha = 0{,}003663$$

e

$$\frac{1}{\alpha} = 273$$

Questo valore di α differisce sì poco da quello trovato per l'aria atmosferica, che questa si può considerare come gaz permanente.

Dividiamo sotto e sopra per α il secondo membro dell'equazione (I), avremo

$$\frac{v}{v_o} = \frac{p_o}{p} \cdot \frac{\frac{1}{\alpha} + t}{\frac{1}{\alpha} + t_o}$$

da cui

$$\frac{pv}{\frac{1}{\alpha} + t} = \frac{p_o v_o}{\frac{1}{\alpha} + t_o}$$

la quale eguaglianza dimostra la costanza della quantità.

$$\text{(II)} \qquad \frac{pv}{\frac{1}{\alpha} + t} = R$$

per un determinato gaz permanente.

Diciamo ora γ il peso specifico cioè il peso dell'unità di volume, (peso di un metro cubo misurato in chilogrammi), si avrà per definizione

$$\gamma v = 1$$

---

(1) Ecco alcuni dei risultati trovati da REGNAULT

	valore di α a volume costante	valore di α a pressione costante
Aria atmosferica	0,003665	0,003670
Idrogeno	0,003667	0,003661
Acido carbonico	0,003688	0,003710

Si vede adunque che il valore di α non è costante. Inoltre e pressione costante α varia colla pressione, dunque, a vero dire, nessun gaz segue rigorosamente le legge di MARIOTTE e GAY LUSSAC.

Servendoci dei dati testè scritti avremo

$$\text{Aria atmosferica} \quad \alpha = 0{,}003665 \qquad \frac{1}{\alpha} = 273{,}26$$

$$\text{Idrogeno} \quad \alpha = 0{,}0036612 \qquad \frac{1}{\alpha} = 273{,}13$$

$$\text{Acido carbonico} \quad \alpha = 0{,}0036522 \qquad \frac{1}{\alpha} = 273{,}81$$

Digitized by Google

da cui

$$v = \frac{1}{\gamma}$$

sostituendo nella (II) essa diviene

$$\text{(III)} \qquad \frac{P}{\gamma\left(\frac{1}{\alpha} + t\right)} = R$$

Cerchiamo ora il valore di R per l'aria atmosferica. Alla temperatura zero e sotto la pressione p di 760 mm. cioè sotto la pressione P di 10334 chilogrammi per metro quadrato, REGNAULT trovò che il peso specifico dell'aria è 1,293187 (1), dunque nella (III) ponendo i valori

$$t = 0^{\circ}$$
$$P = 10334$$
$$\gamma = 1,293187$$
$$\frac{1}{\alpha} = 273$$

avremo

$$R = \frac{10334}{273 .\ 1,293187} = 29,28390$$

Ora sappiamo che in fisica il calore specifico o capacità calorifica d'un corpo si distingue in *capacità calorifica a pressione costante* ed in *capacità calorifica a volume costante*, considerate entrambe sia in *peso* sia in *volume*.

Chiamiamo c_p la prima e c_v la seconda, il rapporto

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

si può ottenere in diversi modi i quali tutti concordano in media al valore

$$k = 1,410$$

trovato da MOLL e VAN BEEK e considerato come il più esatto (2)

---

(1) È da notarsi che il valore di γ è relativo alla latitudine di Parigi. Ecco i valori di γ trovati da REGNAULT per altri gas

Azoto	$\gamma = 1,25616$	che dà	R = 30,134
Ossigeno	$\gamma = 1,42980$	»	R = 26,475
Idrogeno	$\gamma = 0,08957$	»	R = 422,612

(2)

GAY LUSSAC e WELTER	trovarono	$k = 1,372$
CLEMENT e DESORMES	»	1,357
MASSON	»	1,419
BIER (Tab. etc. de la ch. p. 69)	»	1,3945
WEISBACH (Civilingenieur t. V p. 46)	»	1,4025
IL LOVO	»	1,421
MOLL e VAN BEEK	»	1,410

Il calore specifico in peso dell'aria atmosferica a pressione costante fu da REGNAULT trovato eguale a 0,23751, quindi nel rapporto k ponendo

$$k = 1,410 \quad \text{e} \quad c_p = 0,23751$$

troviamo

$$c_v = 0,16844$$

Ciò posto basiamoci sulle seguenti ipotesi;

1. Un gaz perfetto segue rigorosamente la legge di MARIOTTE e GAY-LUSSAC;
2. Il calore specifico a pressione costante d'un gaz perfetto è una quantità costate, lo stesso dicasi pel calore specifico a volume costante,
3. L'aria atmosferica può venir considerata come un gaz perfetto

Consideriamo ora l'unità di peso del gaz avente volume v e pressione p. Elevando di dt la temperatura t di questo gaz, sotto pressione costante, la quantità di calore fornita sarà

$$\text{(IV)} \qquad dQ_p = c_p \, dt$$

Se invece il riscaldamento del gaz avviene sotto volume costante, si avrà

$$\text{(V)} \qquad dQ_v = c_v \, dt$$

Queste stesse quantità di calore si possono anche ricavare dalle equazioni generali (XII) che abbiamo ottenuto nel *Primo Capitolo* di questa *Terza Parte*

Supponiamo che la pressione resti costante durante il riscaldamento, cioè sia

$$p = \text{cost.} \qquad dp = 0$$

l'ultima delle suddette equazioni (XII) diverrà.

$$dQ_p = \frac{AY}{\left(\frac{dt}{dv}\right)} dt$$

Se invece fosse:

$$v = \text{cost} \qquad dv = 0$$

la seconda della (XII) diverrà,

$$dQ_v = \frac{AX}{\left(\frac{dt}{dp}\right)} dt$$

Confrontando questi ultimi valori di dQ_p e dQ_v con quelli (IV) e (V) di questo capitolo, si ha:

$$c_p = \frac{AY}{\left(\frac{dt}{dv}\right)}$$

$$c_v = \frac{AX}{\left(\frac{dt}{dp}\right)}$$

da cui

$$\text{(VI)} \qquad \begin{cases} X = \frac{c_v}{A}\left(\frac{dt}{dp}\right) \\ Y = \frac{c_p}{A}\left(\frac{dt}{dv}\right) \end{cases}$$

Ora l'equazione (II) di questo capitolo dà

$$pv = R\left(\frac{1}{\alpha} + t\right)$$

che differenziata dà

$$\begin{cases} \left(\frac{dt}{dp}\right) = \frac{v}{R} \\ \left(\frac{dt}{dv}\right) = \frac{p}{R} \end{cases}$$

sostituendo in (VI)

$$\begin{cases} X = \frac{c_v v}{AR} \\ Y = \frac{c_p p}{AR} \end{cases}$$

Supponendo ora costanti i calori specifici, queste equazioni differenziate danno

$$\left(\frac{dX}{dv}\right) = \frac{c_v}{AR}$$

$$\left(\frac{dY}{dp}\right) = \frac{c_p}{AR}$$

Per cui, finalmente, sostituendo questi valori nella equazione fondamentale (α) del *Capitolo Primo* a pagina 49 essa diverrà

$$\frac{c_p}{AR} - \frac{c_v}{AR} = 1$$

cioè

$$\text{(VII)} \qquad c_p - c_v = AR$$

rimarchevole relazione che fu data per la prima volta da CLAUSIUS, e dalla quale si ha

$$\text{(VIII)} \qquad A = \frac{1}{E} = \frac{c_p - c_v}{R}$$

e sostituendo ad R il suo valore (III) e ponendo in esso $t = 0°$, avremo

$$\frac{1}{E} = \frac{\frac{t}{\alpha}\left(c_p - c_v\right)}{p}$$

cioè

$$\text{(IX)} \qquad E = \frac{p\alpha}{t\left(c_p - c_v\right)}$$

formola che determina l'equivalente meccanico del calore pei gaz permanenti

Applicando la (VIII) all'aria atmosferica per la quale trovammo:

$$R = 29,28399$$
$$c_p = 0,23751$$
$$c_v = 0,16844$$

e risolvendola rispetto ad E, troviamo

$$E = \frac{29,28399}{0,06907} = 423,94 \text{ Chgm}$$

La media delle esperienze più precise di JOULE è 425 (1), cioè un valore di poco superiore a questo. Un tale accordo del calcolo coi risultati delle esperienze è la più bella prova della verità delle ipotesi sulle quali riposa la termodinamica

Capitolo III.

Determinazione dell'equivalente meccanico del calore col metodo di BOURGET.

La formola determinatrice di E ottenuta coll'applicazione ai gaz permanenti delle equazioni differenziali, si può determinare con un

(1) Vedi *Parte Seconda — Capitolo III*

Digitized by Google

metodo assai elementare dato dal signor BOURGET nel 1850, senza appoggiarsi a veruna ipotesi (1)

Sieno v, t, p il volume, la temperatura e la pressione d'un gaz occupante uno spazio di un metro cubo alla pressione P ed alla temperatura di 0°. Avremo

$$\text{(I)} \qquad pv = P\,(1 + \alpha t)$$

Prendiamo ora

$$OA' = v \quad , \quad AA' = p$$

la posizione del punto A rappresenterà lo stato del gaz e se la temperatura o la pressione di questo gaz variano, il punto A varierà di posizione ed avremo una curva. Se questa curva ritorna al punto A di partenza avremo ciò che si chiama un *ciclo chiuso*

Ciò posto, consideriamo un caso particolare, supponiamo cioè che la pressione e la temperatura varino in modo che gli stati successivi del gaz sieno rappresentati dai punti di un circuito chiuso di forma rettangolare percorso nel senso ADBCA e cerchiamo la quantità di calore spesa in questo tragitto onde paragonarla col lavoro effettuato.

Avremo a considerare i quattro punti seguenti

1. Quando il gaz passa dallo stato A allo stato D la sua pressione AA' diviene A'D, aumenta cioè di AD, ma il volume non varia, se denotiamo con p' questa nuova pressione A'D, la temperatura t_1 sarà data dalla relazione

$$\text{(II)} \qquad p'v = P\,(1 + \alpha t_1)$$

dalla quale sottraendo la (I) si ha

$$\text{(III)} \qquad (p' - p)\,v = P\alpha\,(t_1 - t) \text{ (2)}$$

---

(1) *Annales de ch. et de phys.* terza serie, t. LVI pag. 257

(2) È probabilmente per errore di stampa che tanto negli *Ann. de ch. et de phys.* quanto nel DAGUIN *Cours de phys.* che riportò tale dimostrazione a pag. 512, t. II, si trova

$$(p' - p)\,v = H\alpha\,(t - t_1)$$

essendo H ed α le quantità che noi chiamammo P ed α.

La quantità di calore spesa per produrre l'aumento di pressione $(p' - p)$ sarà

(IV) $$q = \gamma c_v (t_1 - t)$$

essendo γ il peso di un metro cubo di gaz a zero gradi e c_v il calorico specifico a volume costante.

Ricavando dalla (III) il valore di $(t_1 - t)$ e sostituendolo nella (IV), avremo

$$q = \frac{\gamma}{P\alpha} c_v v (p' - p)$$

2. Quando il gaz passa dallo stato D allo stato B esso si dilata di DB senza che la pressione abbia variato, il suo volume diventa v' e la sua temperatura t' è data dall'equazione

(V) $$p'v' = P(1 + \alpha t')$$

togliendo da questa la (II) si ha.

$$p'(v' - v) = P\alpha (t' - t_1)$$

Designando con c_p la capacità calorifica a pressione costante, la quantità di calore spesa sarà

$$q_1 = \gamma c_p (t' - t_1) = \frac{\gamma}{P\alpha} c_p p' (v' - v)$$

3. Passando dallo stato B allo stato C il gaz si raffredda senza cangiare di volume, la sua temperatura t_2 è data dalla relazione

(VI) $$pv' = P(1 + \alpha t_2)$$

la quale tolta dalla (V) dà

$$(p' - p) v' = P\alpha (t' - t_2)$$

e il calore *raccolto* sarà

$$q' = \gamma c_v (t' - t_2) = \frac{\gamma}{P\alpha} c_v v' (p' - p)$$

4. Finalmente quando il gaz passa dallo stato C allo stato A primitivo esso si raffredda a pressione costante, la sua temperatura ritorna t e la relazione

$$pv = P(1 + \alpha t)$$

sottratta dalla (VI) dà

$$p(v' - v) = P\alpha (t_2 - t)$$

per cui

$$q_1' = \gamma c_p (t_2 - t) = \frac{\gamma}{P\alpha} c_p p (v' - v)$$

La spesa di calore Q sarà dunque:

$$Q = q + q_1 = \frac{1}{P\alpha}\left[c_v v\,(p' - p) + c_p p'\,(v' - v)\right]$$

ed il calore raccolto:

$$Q' = q' + q_1' = \frac{1}{P\alpha}\left[c_v v'\,(p' - p) + c_p p\,(v' - v)\right]$$

per conseguenza la spesa definitiva totale di calore sarà

$$\text{(VII)} \quad Q - Q' = \frac{\gamma}{P\alpha}\,(c_p - c_v)\,(p' - p)\,(v' - v)$$

La quantità $Q - Q'$ non può esser nulla, quindi *quando un gaz cambia di stato per ritornare al suo stato iniziale, v'è sempre una certa quantità di calore annullata proporzionale all'area:*

$$(p' - p)\,(v' - v)$$

Passiamo ora a cercare il lavoro motore svolto durante il moto del punto A sul perimetro del rettangolo

Lungo il cammino ADB il lavoro *motore* è

$$L = p'\,(v' - v)$$

lungo il cammino BCA il lavoro *resistente* è

$$L' = p\,(v' - v)$$

Il lavoro motore del gaz lungo il circuito chiuso è adunque

$$\text{(VIII)} \quad L - L' = (p' - p)\,(v' - v)$$

cioè è rappresentata dall'area $(p' - p)\,(v' - v)$, ossia dall'area del rettangolo ADBC, dunque, pel teorema testè dimostrato rimane parimenti dimostrato il primo principio fondamentale di termodinamica *il calore perduto è proporzionale al lavoro prodotto.*

Sostituendo la (VIII) in (VII) si ha:

$$Q - Q' = \frac{\gamma}{P\alpha}\,(c_p - c_v)\,(L - L')$$

ossia

$$L - L' = \frac{P\alpha}{\gamma\,(c_p - c_v)}\,(Q - Q')$$

che è l'equazione fondamentale data sotto la forma $L = EQ$ nella *Introduzione*, pagina 5

Il coefficente di $Q - Q'$ è ciò che fu detto equivalente meccanico del calore, laonde

$$E = \frac{P\pi}{\gamma\,(c_p - c_v)}$$

formola già ottenuta nel capitolo precedente e la quale, applicata all'aria atmosferica, ci diede:

$$E = 423{,}974 \text{ Chgm}$$

Capitolo IV.

Determinazione dell'equivalente meccanico del calore col metodo dato dal Professore Codazza

Termineremo questa Terza ed ultima parte del nostro lavoro col determinare la formola, già ottenuta in due modi, per l'equivalente meccanico del calore con un modo semplice ed elegante esposto dal chiarissimo Prof. G. Codazza nelle sue lezioni di *Fisica Industriale*, professate nel R. Museo Industriale di Torino.

Sia π il peso d'un dato gaz di cui si porti la temperatura da t_0 a t_1; sieno c_p le sue calorie di temperatura a pressione P costante.

Il lavoro occorrente a produrre il riscaldamento di questo peso π di gaz sotto pressione costante è:

$$L_p = E\,\pi\,c_p\,(t_1 - t_0)$$

Sieno c_v le calorie di temperatura, di questo stesso gaz, a volume costante, il lavoro occorrente a produrre il riscaldamento di questo peso π di gaz sotto volume costante è:

$$L_v = E\,\pi\,c_v\,(t_1 - t_0)$$

Indicando con L_{vv} il lavoro occorrente a produrre la variazione di volume, e designando con γ, come nei capitoli precedenti, il peso di un metro cubo di questo gaz a 0° sotto la stessa pressione P, questo lavoro sarà espresso da:

$$L_{vv} = P\,\alpha\,(t_1 - t_0)\,\frac{\pi}{\gamma}$$

Ora è evidente il seguente lemma:

Il lavoro occorrente a produrre il riscaldamento di un dato peso di gaz sotto pressione costante è eguale al lavoro occorrente a pro-

Digitized by Google

durre il riscaldamento dello stesso gaz so to volume costante, piu il lavoro occorrente a produrre la variazione di volume, cioè è evidente che si ha:

$$L_p = L_v + L_{cv}$$

cioè sostituendo

$$E \pi c_p (t_1 - t_0) = E \pi c_v (t_1 - t_0) + P \pi (t - t_0) \frac{\pi}{\gamma}$$

ossia, semplificando

$$E c_p = E c_v + \frac{P\pi}{\gamma}$$

da cui

$$E = \frac{P\pi}{\gamma (c_p - c_v)}$$

come volevasi dimostrare.

TAVOLA RIASSUNTIVA

dei principali valori trovati coll'esperienza e col calcolo per l'equivalente meccanico del calore.

DATA	Esperimentatori e calcolatori	MODO DI DETERMINAZIONE	Valore di E in chilogrammetri	Vedi a pagina
1798	RUMFORD	Col dati delle sue esperienze sull'attrito dei solidi	518,84	11
1839	SEGUIN	Calcolato più tardi coi dati di esperienze sull'espansione del vapore	449	16
1842	MAYER	Compressione dell'aria atmosferica	365	17
1843	COLDING	Attrito	350	18
»	JOULE	Induzioni magneto-elettriche	430,87	35
1845	Id.	Compressione dell'aria a 21,5 atmosfer.	452,58	36
»	Id.	id. a 10,5 id.	437,90	36
»	Id.	Dilatazione dell'aria da 21 ad 1 atmosf.	450,87	37
»	Id.	id. da 10 ad 1 id.	417,38	37
»	Id.	id. da 23 a 14 id.	417,90	37
1847	HOLTZMANN	Dilatazione dell'aria, calcolato coi dati di DULONG	371	22
1849	JOULE	Attrito dell'acqua	424,53	39
»	Id.	Attrito del mercurio	425,34	39
»	Id.	Attrito dei solidi (ghisa)	425,75	39
1857	HIRN	Attrito dei solidi	371,6	40
» a 1865	Id.	Attrito dell'acqua	432	41
1857	Id.	Schiacciamento del piombo	425	43
»	Id.	Efflusso dell'acqua da orifizi ristretti	432,62	41
»	Id.	Disaggregazione dei corpi	425	21
»	Id.	Lavoro delle macchine a vapore (corretto da CLAUSIUS)	413	21
»	FAVRE	Calore delle correnti che producono lavoro	443	43
»	Id.	Attrito dell'acciaio	413,2	44
»	LENOUX	Calore svolto dalle macchine magneto-elettriche	437,39	45
»	TRESCA e LABOULAYE	Compressione ed espansione dell'aria	433	23
»	MATTEUCCI	Calore svolto dalle correnti indotte	438,98	46
»	QUINTUS ICILIUS	Calore delle correnti che producono lavoro	399,7	25
»	BOSSCHA	Calore svolto in un elettro-motore alla Daniell	419,5	25
1865	EDLUND	Variazioni di temperatura nei fili metallici	430,06	47
[illegible]	[illegible]	Calcolato colla formula $$E = \frac{p\alpha}{\rho(c_p - c_v)}$$ e coi dati di REGNAULT e di MOLL e VAN BEEK	423,974	55
[illegible]	[illegible]	Medio dei valori più esatti di JOULE, HIRN, FAVRE e BOSSCHA	425,68	

Errata-Corrige

Pag	linea			
6	ultima	*keisprocess*	leggi	*kreisprocess*
29	penultima	febbraio 1864	»	febbraio 1854
34	43	(8)	»	(3)
42	11	dol	»	dal
47	penultima	esetta	»	esatta